



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE NANÁŠECÍHO SYSTÉMU PRO
ZPRACOVÁNÍ DVOU KOVOVÝCH PRÁŠKŮ POMOCÍ 3D
TISKU**

DESIGN OF RECOATING SYSTEM FOR PROCESSING OF TWO METAL POWDERS USING 3D PRINTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radoslav Guráň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Radoslav Guráš**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce nanášecího systému pro zpracování dvou kovových prášků pomocí 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Použití více materiálů v průběhu procesu výroby aditivní technologií selective laser melting nebylo doposud nijak významně prozkoumáno. Průmyslové aplikace využívající multimateriálové kovové spoje komplexního tvaru či komponenty složitých tvarů kombinované z více kovových materiálů jsou značně omezené technologiemi umožňujícími spojení (svařování, lepení) o definované pevnosti. Použití více kovových materiálů a ověření pevnosti materiálového rozhraní by významně rozšířilo aplikační možnosti aditivních technologií.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je navrhnout zařízení pro nanášení dvou různých kovových prášků s těmito parametry: kompatibilita s 3D tiskárnou kovových materiálů SLM280HL, minimální kontaminace druhého prášku, možnost nanášení dvou materiálů v jedné vrstvě.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled současných řešení pro tisk ze dvou materiálů,
- identifikovat možnosti implementace oddělené dodávky prášků,
- navrhnout nanášecí zařízení umožňující kontrolované nanášení dvou různých prášků,
- realizovat prototyp nanášecího zařízení,
- ověřit funkčnost nanášecího zařízení sérií testů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

CHIVEL, Y., C.H. WONG, A. DIATLOV a C. EMMELMANN New Approach to Multi-material Processing in Selective Laser Melting. Physics Procedia. 2016, 83(2), 891-898. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.093. ISSN 18753892. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389216302000>

ANSTAETT, C. a C. SEIDEL Multi-Material Processing Next step in laser-based powder bed fusion. Laser Technik Journal [online]. 4, 28–31. Dostupné z: doi:10.1002/latj.201600027

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem, konstrukcí a testováním zařízení pro nanášení dvou různých kovových prášků, které je schopné kompatibilně pracovat s 3D tiskárnou kovových materiálů SLM 280HL. Jelikož oblast multimateriálového tisku kovů technologie selective laser melting (SLM) nebyla doposud nijak významně prozkoumána, byl zpracován přehled existujících patentů a možných přístupů k řešení. Zařízení bylo úspěšně zkonstruováno a byly provedeny série testů definující problematiku nanášení vylepšené hlavice, která používá trysku a vibrační motorek s excentrem. Na základě vykonaných experimentů byly definovány nanášecí parametry multimateriálové vrstvy z materiálů FeAm a 316L. K navrhnutému zařízení byl vytvořen ovládací systém pro částečnou automatizaci procesu. Zařízení bylo implementované do tiskárny, ve které byla demonstrována jak možnost nanášení jedné multimateriálové vrstvy o minimální tloušťce 50 μm , tak schopnost výroby 3D multimateriálového dílu, složeného až z 200 vrstev a obsahujícího změnu materiálu ve všech osách.

KLÍČOVÁ SLOVA

Multimateriálový tisk, selektivní laserové tavení (SLM), aditivní technologie, nanášecí systém,

ABSTRACT

The thesis deals with the design, construction and testing of two different metal powder coating equipment, which is able to work with SLM 280HL metal 3D printer. Since the field of multimaterial metal printing by selective laser melting (SLM) has not been significantly investigated yet, an overview of existing patents and possible approaches to the solution has been developed. The device has been successfully designed and a series of tests was carried out defining the issue of applying an improved head that uses a nozzle and an eccentric vibration motor. Based on the experiments performed, the coating parameters of the multimaterial layer of FeAm and 316L materials were defined. A control system for the partial process automation was created for the proposed device. The device was implemented in a printer that demonstrated both the ability to apply a single multimaterial layer of at least 50 μm thickness, and the ability to produce a 3D multimaterial component comprised of up to 200 layers and containing material change across all axes.

KEYWORDS

Multimaterial printing, selective laser melting (SLM), additive technology, recoating system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GURÁŇ, Radoslav. *Konstrukce nanášecího systému pro zpracování dvou kovových prášků pomocí 3D tisku*. Brno, 2019, 96 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Danielovi Koutnému, Ph.D. za to že si mě vybral jako diplomanta pro toto téma, za jeho vždy přívětivý přístup, vedení a poskytnutí jak odborných rad, tak prostředků pro úspěšné dosažení cílů. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za jejich obrovskou podporu a pomoc v průběhu celého studia, bez které by to nešlo.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Daniela Koutného, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Radoslav Guráň

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Aditivní technologie schopné multimateriálového tisku	14
2.2	Technologie Selektivního Laserového Tavení (SLM)	15
2.2.1	Multimateriálový tisk technologií SLM	16
2.3	Způsoby nanášení prášku	18
2.3.1	Úprava zásobníku nanášeče pro tvorbu laminárních dílů	20
2.3.2	Úprava zásobníku nanášeče pro tvorbu multimateriálových dílů	21
2.3.3	Úprava zásobníku nanášeče pro tvorbu gradientního přechodu	22
2.3.4	Systém dávkování prášku	23
2.3.5	Multimateriálový tisk za pomoci odsávání celé vrstvy prášku	24
2.3.6	Multimateriálový tisk za pomoci selektivního odsávání prášku	25
2.3.7	Multimateriálový tisk za pomoci nanášeče a přídavné trysky	25
2.3.8	Aerosint – Prototyp multimateriálové tiskárny SLM	26
2.3.9	Dávkovací systém s pipetou	28
2.3.10	Nanášecí válec rozdělený na prstence	31
2.3.11	Iro3D – Prototyp multimateriálové tiskárny	32
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	33
3.1	Analýza problému	33
3.2	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	34
3.3	Podstata a cíle diplomové práce	35
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	36
4.1	Rozbor koncepčního řešení	36
4.2	Externí nanášecí zařízení	38
4.3	Možnosti implementace vedení do komory tiskárny SLM 280HL	38
4.4	Volba typu vedení a pohonů	40
4.5	Nanášecí hlavice pro jeden materiál	42
4.6	Nanášecí hlavice pro dva materiály	44
4.6.1	1. Koncept hlavice	44
4.6.2	2. Koncept hlavice	45
4.6.3	3. Koncept hlavice	48
4.7	Nanášecí prvek	49

4.7.1	Pipeta	49
4.7.2	Tryska	50
4.8	Vibrační prvek	50
4.8.1	Piezokeramický měnič	50
4.8.2	Vibrační motorek s excentrem	51
4.9	Zásobníky prášku	51
4.10	Řízení procesu tisku	52
4.10.1	Externí ovládání nanášecího zařízení	55
4.11	Zhodnocení a postup řešení	55
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	57
5.1	Vývojová část	57
5.1.1	Externí nanášecí zařízení	57
5.1.2	Testování nanášecích hlavic a určení nanášecích parametrů	58
5.1.3	Zhodnocení vývojové části a v ní dosažených výsledků	68
5.2	Konstrukční část	68
5.2.1	Konstrukce nanášeče	69
5.2.2	Konstrukce hlavního zásobníku prášku	72
5.2.3	Externí řídicí systém	74
5.3	Testovací část	78
5.3.1	Kalibrace motorů pomocí referenčního tisku	78
5.3.2	Kalibrace nanášecího zařízení s tiskárnou	78
5.3.3	Nanášení multimateriálové vrstvy	79
5.4	Tisk 3D multimateriálového dílu	80
6	DISKUZE	81
7	ZÁVĚR	83
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	84
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	87
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	88
11	SEZNAM TABULEK	92
12	SEZNAM PŘÍLOH	93
12.1	Příloha A	94

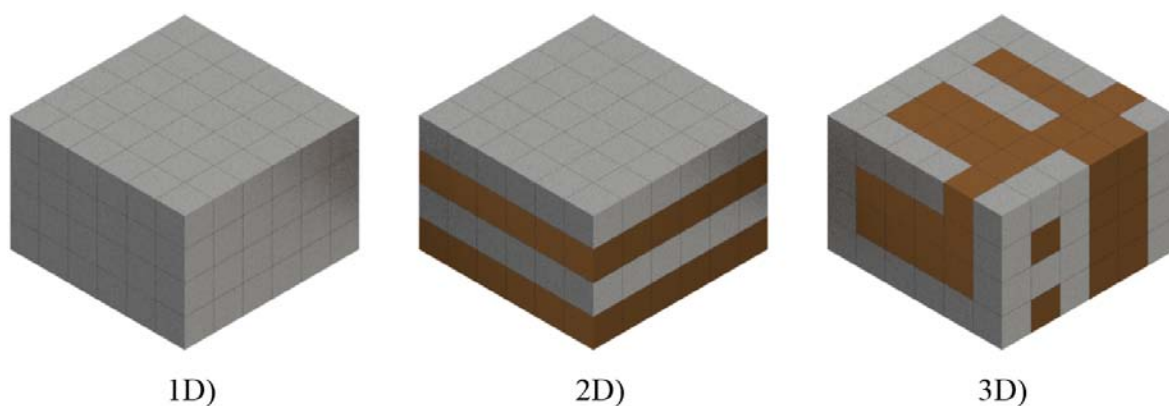
1 ÚVOD

Aditivní technologie (AM) představují rozsáhlou oblast moderních technologií fungujících na principu tvorby dílu vrstvu po vrstvě [1]. Tato technologie na sebe v posledních deseti letech přitahuje mnoho pozornosti. Je to zejména kvůli bezkonkurenční svobodě designu, krátké dodací lhůtě a taky možnosti sériové výroby [2]. Dnes je pomocí aditivních technologií možné zpracovávat nejenom plasty, ale taky širokou škálu kovů včetně důležitých strojních materiálů jakými jsou ocel, hliník nebo titan. Zmíněné materiály mohou být zpracovány s vynikajícími mechanickými vlastnostmi a výslednou relativní hustotou dosahující až 100 % [1]. Výroba selektivním laserovým tavením (SLM) je jednou z nejpoužívanějších aditivních technologií (AM) kovů. Technologie (SLM) využívá laserového paprsku k systematickému tavení kovového prášku naneseného vrstvu po vrstvě na tiskovou plochu.

Práce se zabývá oblastí multimateriálového tisku, protože použití více materiálů v průběhu procesu výroby aditivní technologií (SLM) nebylo doposud nijak významně prozkoumáno. I když komponenty složitých tvarů, které jsou tvořeny z více než jednoho materiálu, jsou v průmyslu žádané, jejich výroba je značně omezena technologiemi umožňujícími spojení (svařování, lepení) o definované pevnosti. Použití více kovových materiálů a ověření pevnosti materiálového rozhraní by významně rozšířilo aplikační možnosti aditivních technologií.

Hlavním cílem práce je navrhnout a sestavit zařízení, které bude schopné nanášet dva různé kovové prášky tak, že bude zabezpečena výroba nejenom laminárních součástí (jeden materiál na nanesenou vrstvu), ale taky 3D multimateriálových součástí (libovolná změna materiálu) (viz Obr. 1-1). Na sestrojeném zařízení budou následně provedeny série testů nanášení, jejichž přesnost se bude vizuálně vyhodnocovat.

Téma je pro autora zajímavé především svým uplatněním v průmyslu a použitím výstupů práce pro další studium dané problematiky.



Obr. 1-1: Proces multimateriálového tisku součástí. 1D) jednomateriálová součást, 2D) laminární součást, 3D) 3D multimateriálová součást

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Aditivní technologie schopné multimateriálového tisku

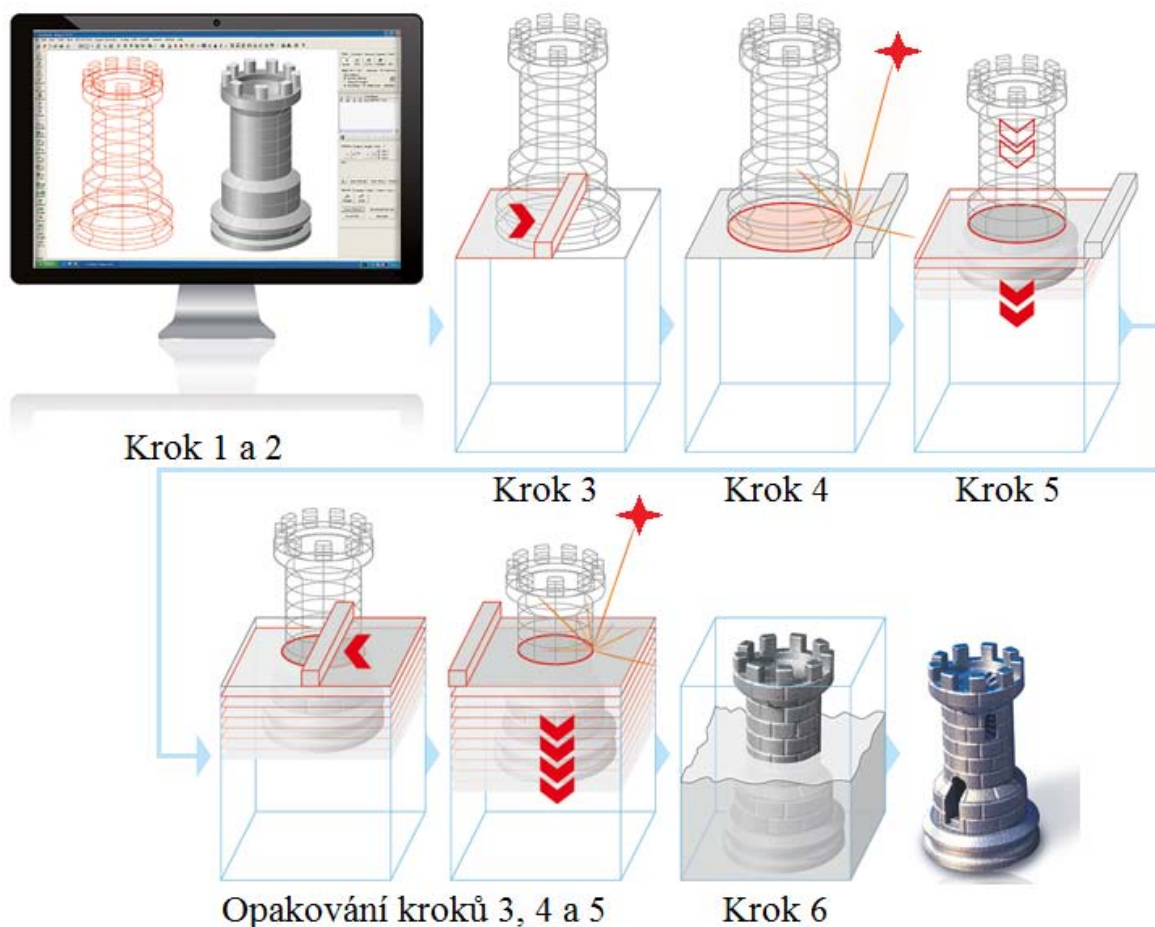
V dnešní době existuje již více aditivních technologií, které jsou schopny multimateriálového tisku, tedy vyrábět součást z více materiálů najednou [3]. Technologie fused deposition modeling (FDM) je díky svojí nízké ceně a technické nenáročnosti nejrozšířenější aditivní technologií pro výrobu plastů na světě. Při této technologii je vlákno materiálu vytahované ze zásobníku ohřáté a následně vtlačované do trysky, pomocí které je materiál nanášen vrstvu po vrstvě. Technologie již byla rozvinuta na více materiálový tisk dokonce až pěti materiálů najednou [4]. Další aditivní technologií je stereolitografie (SLA), kterou je taky možné upravit pro multimateriálový tisk tak, že je využito dvou nebo více nádrží s lázní různých materiálů [3]. Nejvyužívanější multimateriálovou aditivní technologií je však technologie polyjet (PJ), která vytváří objekty, podobně jako dvourozměrná inkoustová tiskárna. Materiály jsou protlačeny skrz množství trysek na tiskovou plošinu pomocí kontinuálního nebo „drop on demand“ systému nanášení na celou vrstvu, kde se následně pomocí ultrafialového (UV) světla vytvrdí. Stejným postupem pokračuje stavba součásti vrstvu po vrstvě. Velkou výhodou této technologie je že dokáže vytvářet součásti z více materiálů najednou a kombinovat plnou škálu barev CMYKW v jednom tisku, co umožňuje rychlou výrobu realistických dílů (viz Obr. 2-1) [5].



Obr. 2-1: Součást vyrobená technologií PolyJet (PJ) [6]

2.2 Technologie Selektivního Laserového Tavení (SLM)

Proces výroby dílu pomocí technologie selektivního laserového tavení (SLM) je rozdělený na šest základních kroků (viz Obr. 2-2). V prvním kroku se za pomoci CAD softwaru vytvoří 3D-CAD model požadované součástky s výstupním formátem STL. V druhém kroku se STL model nahraje do softwaru určeného na zpracování modelu pro 3D tisk. V tomto softwaru se model ustaví na virtuální platformu odpovídající rozměrům používané 3D tiskárny, přičemž se nastaví podpůrné struktury, zvolí se výrobní parametry a model je následně automaticky rozdělen do jednotlivých vrstev, ze kterých budeme součást tisknout (vrstvy jsou řádově v desítkách mikrometrů). Výstupem druhého kroku je vygenerovaný G-code pro tiskárnu, který se přenese do stroje pro selektivní laserové tavení [7].

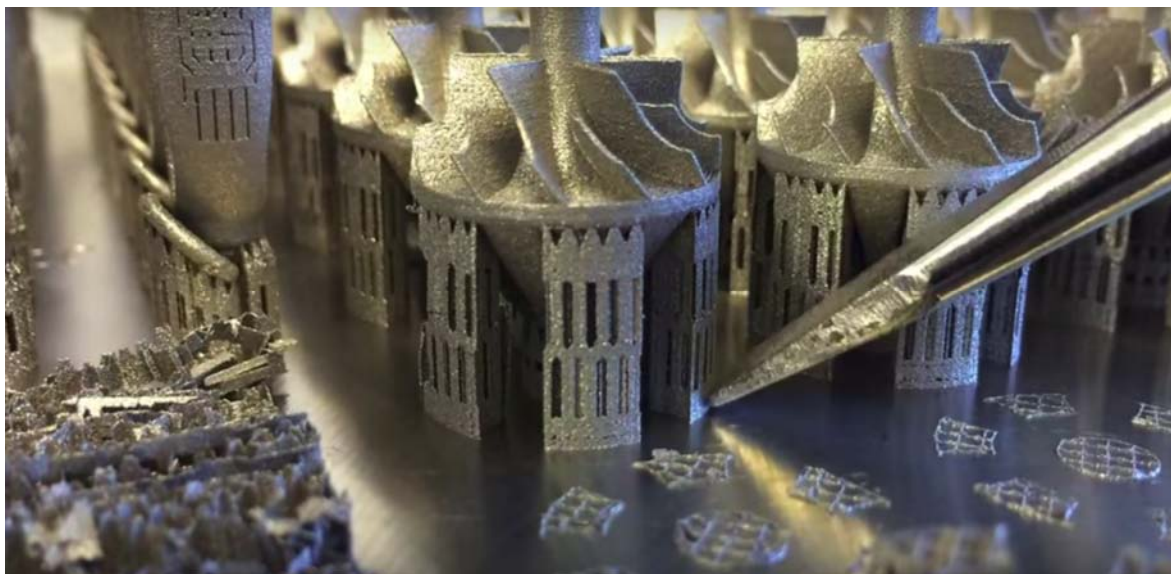


Obr. 2-2: Proces výroby technologií Selektivním Laserovým Tavením (SLM) [8]

V třetím kroku se na tiskovou plochu nanese vrstva práškového materiálu, na které se ve čtvrtém kroku pomocí laseru automaticky vypálí plochy součásti vyskytující se v odpovídající vrstvě. Pátým krokem je posuv platformy, na které tisk probíhá o vzdálenost jedné tloušťky vrstvy dolů, díky čemu se proces nanesení a vypálení může dále opakovat vrstvu po vrstvě až do ukončení celého G-codu. Vzhledem k tomu, že se používají standardní kovové prášky, které se úplně roztaví, mechanické vlastnosti součásti vytvořené touto

technologií odpovídají nebo dokonce překonávají vlastnosti běžně vyráběných dílů (obrábění, lití). Celý proces probíhá v inertní atmosféře (argon, dusík), a to kvůli zabránění nežádoucích reakcí kyslíku s roztaveným materiálem. V posledním, šestém kroku, proběhne odsátí veškerého nevyužitého prášku z pracovní komory, který je možné znovu použít k tisku, a vyrobený díl je spolu s platformou tiskové plochy odebrán z tiskárny [7].

Hotový díl vyrobený touto technologií musí projít následným zpracováním. Pro dobrou stabilitu v průběhu tisku je díl pevně ukotven k platformě, čili musí být od ní nejprve odříznout (viz Obr. 2-3). Na závěr se z dílu mechanicky odstraní veškeré podpůrné struktury, které byly použity pro plnohodnotnou stavbu dílu [7,9].

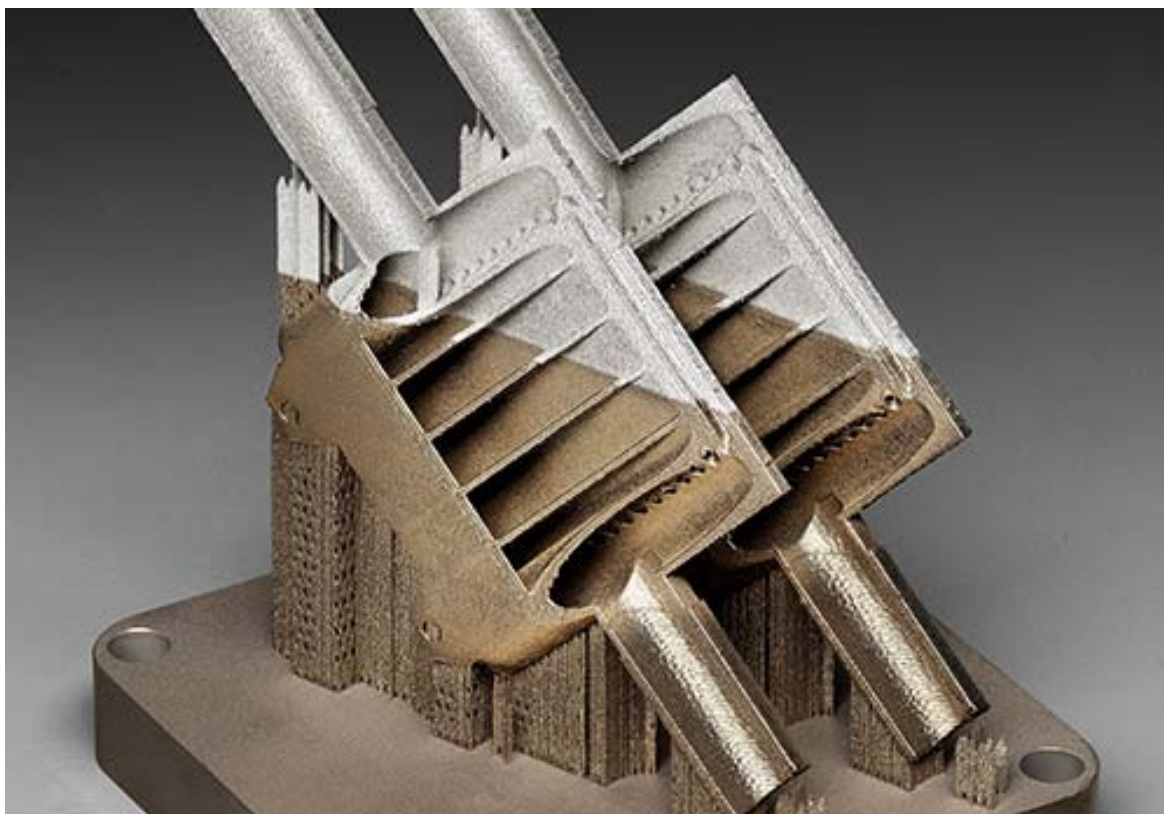


Obr. 2-3: Odstraňování podpůrných struktur [10]

Touto technologií je možné zpracovávat celou řadu práškových kovových materiálů. Mezi materiály, které se v této technologii běžně používají, patří nástrojové a nerezové oceli, slitiny hliníku, titanu, mědi, niklu a další. Škála použitelných materiálů se neustále zvětšuje v důsledku aktivního výzkumu v oblasti materiálů pro použití v aditivní výrobě [11].

2.2.1 Multimateriálový tisk technologií SLM

Součásti vyrobené pouze z jednoho materiálu mnohokrát nepotřebují stejné mechanické vlastnosti ve všech místech. V mnohých případech není ani nutné využití stejné kvality materiálů v celém objemu. Z tohoto důvodu se průmysl zajímá o možnost výroby multimateriálových dílů, kde by bylo v budoucnosti možné dosáhnout toho, že vyrobená součást bude mít ve svém celku například dva odlišné materiály, z kterých je jeden vodivý a druhý nevodivý. Nejedná se pouze o možnost regulace vedení elektrického proudu, ale například o dvojici magnetického a nemagnetického materiálu, dobře tepelně vodivého a slabě tepelně vodivého materiálu, nebo elastického a neelastického materiálu. Součásti vyrobené z více materiálů získávají ve světě stále větší uplatnění a stoupají na oblibě [3].

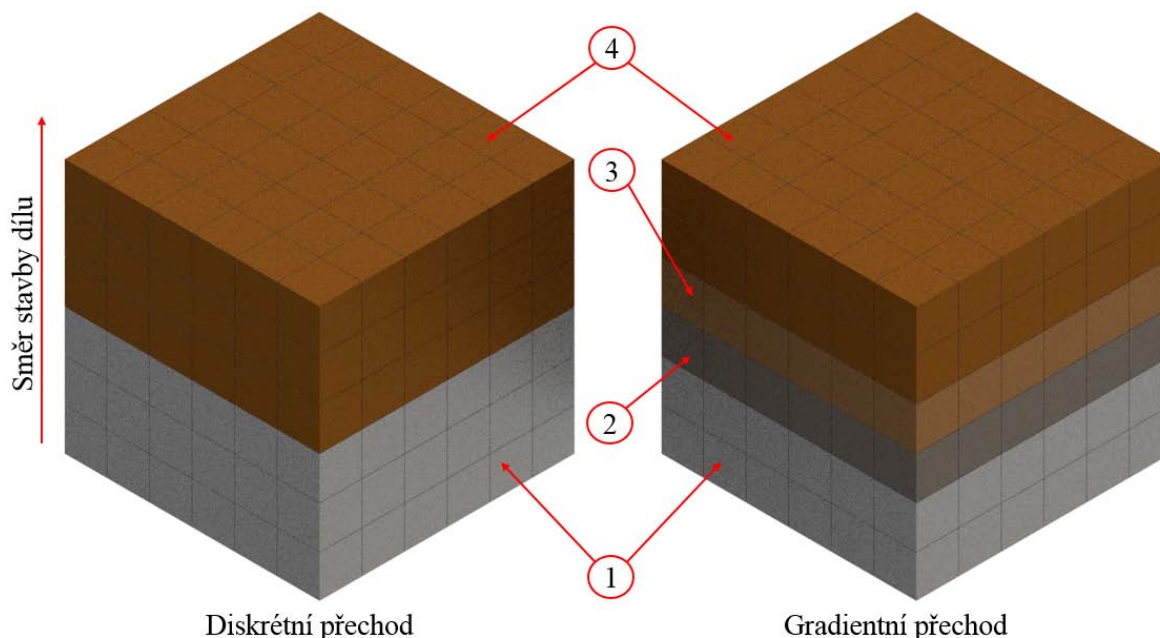


Obr. 2-4: Součást vyrobená ze dvou materiálů (nerezová ocel (SS 316) a niklová super-slitina (Inconel 718) [12]

I když se v současné době výzkumem multimateriálového tisku technologií selektivního laserového tavení (SLM) zabývá několik výzkumných skupin, stále se jedná o oblast výroby, která je nová a doposud neprobádaná. Výrobní komplikace u této technologie nastávají převážně v oblasti přechodu mezi dvěma prášky, a to z důvodu jejich rozdílných vlastností. Touto problematikou se zabývali například výzkumní pracovníci instituce Fraunhofer IGCV v Německém Augsburgu [14]. Ve svém výzkumu se zaměřili na diskrétní a gradientní přechod mezi práškem nástrojové oceli a práškem mědi (viz Obr. 2-4). Diskrétní přechod je definován jako kombinace dvou anebo více materiálů, při niž jsou vzájemně sousedící materiály odděleny jasně viditelným přechodem. Alternativní cestou je přechod gradientní, u kterého jsou sousedící materiály odděleny přechodovou oblastí obsahující hladkou změnou z jednoho materiálu do druhého. Nicméně v jejich výzkumu byl gradientní přechod specifikován jako vhodnější, ale mnohem složitější na přípravu i výrobu [13].

Gradientního přechodu je možné dosáhnout více způsoby. Tím nejlogičtější způsobem je nanášení vrstvy směsi dvou materiálů. To však znamená, že na vytvoření jednoduché kostky s gradientním přechodem (viz Obr. 2-5 Gradientní přechod) je nutné mít zařízení s dvěma separátními zásobníky práškového materiálu a nanášecí systém, který dokáže zabezpečit jejich rovnoměrné promíchání v průběhu nanášení. Nanášecí systém by tak mohl regulovat i tloušťku gradientního přechodu, čili množství jednotlivých vrstev a poměr směsi v každé z nich. Aby tento způsob fungoval, je nutné taky regulovat výkon laseru pro každou směs

materiálu samostatně, jelikož teplota tání, nebo velikost zrna každého z materiálů je odlišná. Jako alternativní řešení lze použít různé systémy nanášení prášku. Jednou z hlavních výhod této koncepce je to, že před samotným tiskem nedochází ke kontaminaci dvou prášků, a není tak třeba zajistit předpřipravenou směs, nebo se obávat přerušení tisku z důvodu nedostatku materiálu v zásobníku [13,14].

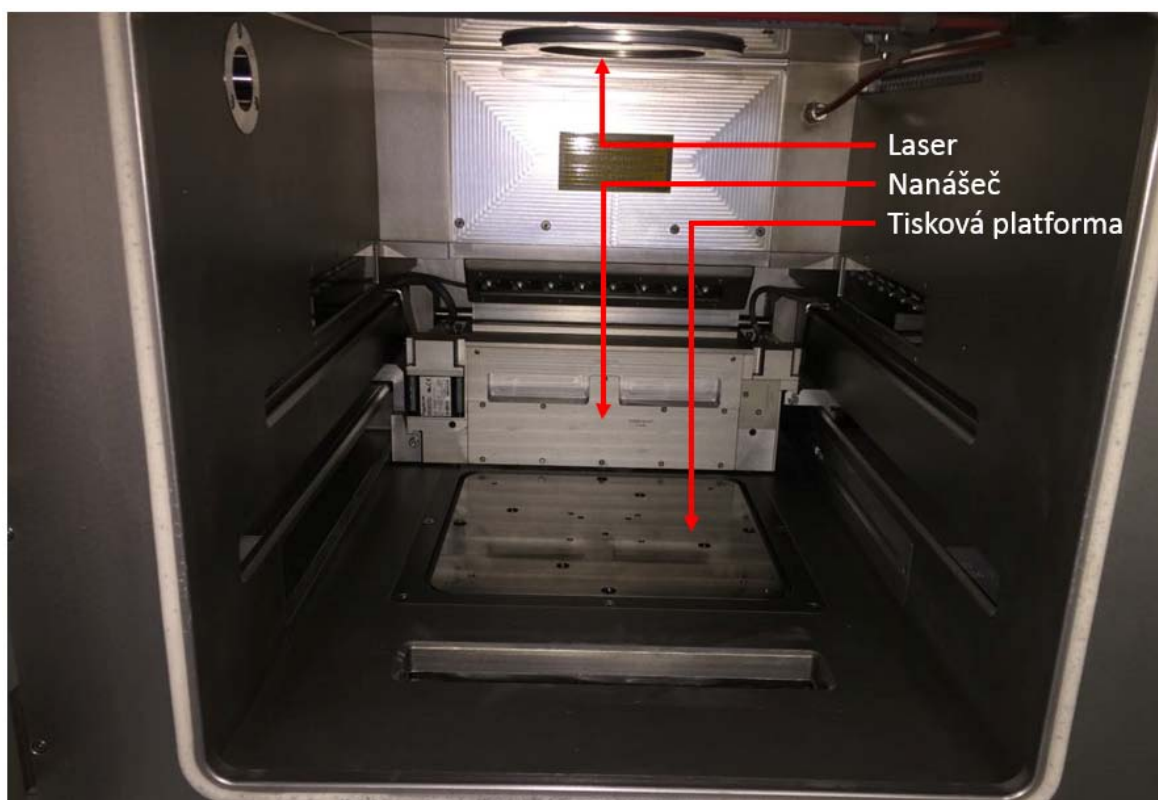


Obr. 2-5: Ukázka diskrétního a gradientního přechodu mezi práškem nástrojové oceli a práškem mědi. Různé materiály a jejich odpovídající sady parametrů jsou barevně odlišné. Například sada parametrů (1) pro 100 % nástrojové oceli, sada parametrů (2) pro směs 70 % nástrojové oceli a 30 % mědi, sada parametrů (3) pro 30 % nástrojové oceli a 70 % mědi a sada parametrů (4) pro 100 % mědi.

Nevýhodou multimateriálového tisku technologií selektivního laserového tavení (SLM) je obtížnost výroby (jelikož tisk probíhá v inertní atmosféře) a kontaminace prášků, které jsou velmi nákladné a jejich plýtváním se celý proces tisku velmi prodražuje. Podstatnou nevýhodou je ale nemožnost kombinace libovolných práškových materiálů.

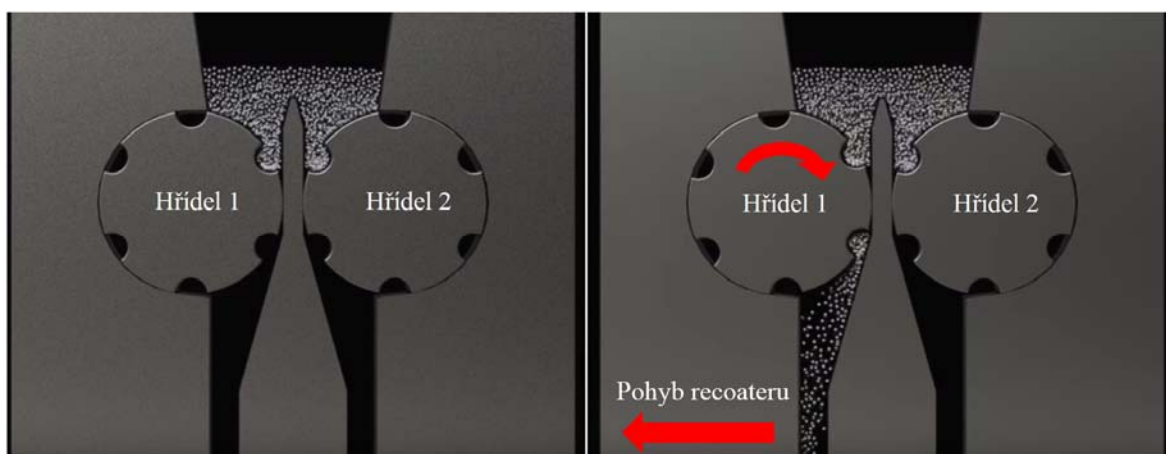
2.3 Způsoby nanášení prášku

Proces nanášení vrstev prášku v technologii selektivního laserového tavení (SLM), je jedním z nejdůležitějších procesů této technologie a probíhá v tiskové komoře zařízení (viz Obr 2-6). Nanesení vrstvy prášku zajišťuje nanášecí systém jinak nazývaný taky recoater. Způsoby nanášení vrstev prášků se mohou v závislosti od výrobce zařízení lišit, avšak principiálně se prášek na tiskovou plochu rozhrnuje dvěma způsoby, a to rotujícím válcem, nebo čepelí [13].



Obr. 2-6: Tisková komora zařízení SLM280HL s popisem její hlavních částí

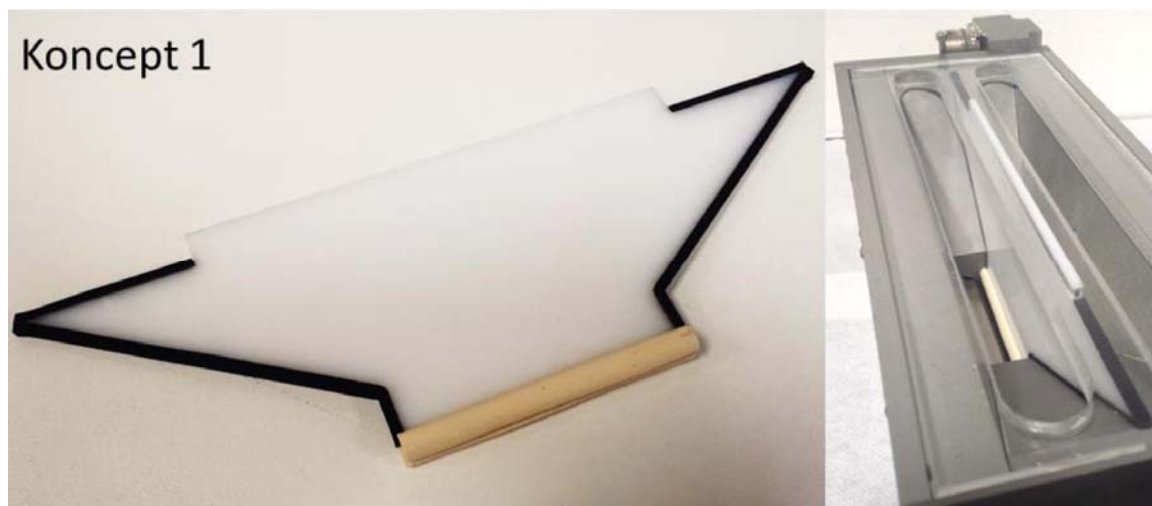
Zařízení SLM280HL obsahuje nanášec se dvěma podélnými dávkovacími hřídeli (viz Obr. 2-7), přičemž první hřídel nanáší práškový materiál v jednom směru a druhý hřídel v směru opačném. Nanesený materiál je dále rovnoměrně rozhrnutý nožem nanášече na tiskovou platformu v požadované tloušťce vrstvy. Dále obsahuje senzory kontrolující dostatečné množství prášku v nanášечи. Pokud senzory zaznamenají nedostatek prášku, proběhne automatické dosypání z hlavního zásobníku. Po nanesení požadované vrstvy prášku všechen přebytečný materiál přepadá odváděcím systémem do prostoru pod tiskovou komoru. Tento prášek může být poté znovu použit k nanášení. Celý proces je řízen a monitorován pomocí ovládacího počítače [13].



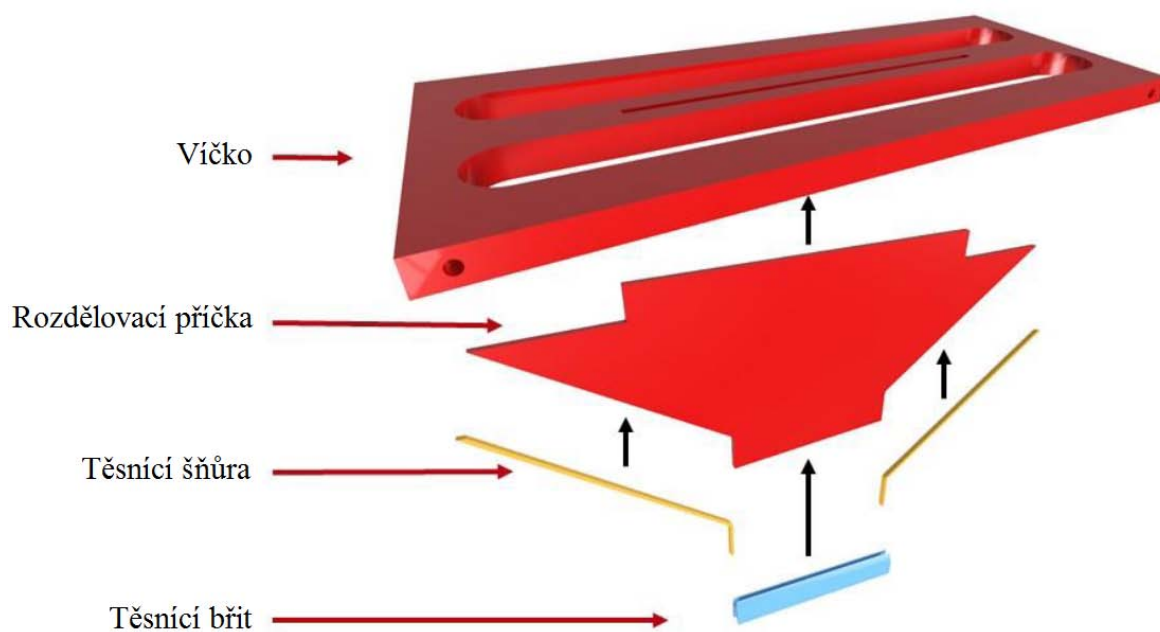
Obr. 2-7: Dávkování materiálu nanášечem SLM280HL [16]

2.3.1 Úprava zásobníku nanášече pro tvorbu laminárních dílů

Upravené nanášecí zařízení přerozděluje zásobník prášku nanášече (viz Obr. 2-7) pomocí rozdělovací příčky vyrobené z plexiskla na dva zásobníky o polovičním objemu (viz Obr. 2-8). Pomocí této důmyslné úpravy je zabezpečeno, že každý z těchto dvou zásobníků funguje pouze s jedním zarovnávacím hřídelem, avšak pouze v jednom směru. Tato jednoduchá konstrukce (viz Obr. 2-9) se ve výsledku ukázala jako nízkonákladové řešení s rychlou aplikací a bezproblémovou montáží či demontáží [13]. Zařízení s touto úpravou je však schopné vytvářet pouze laminární součásti.

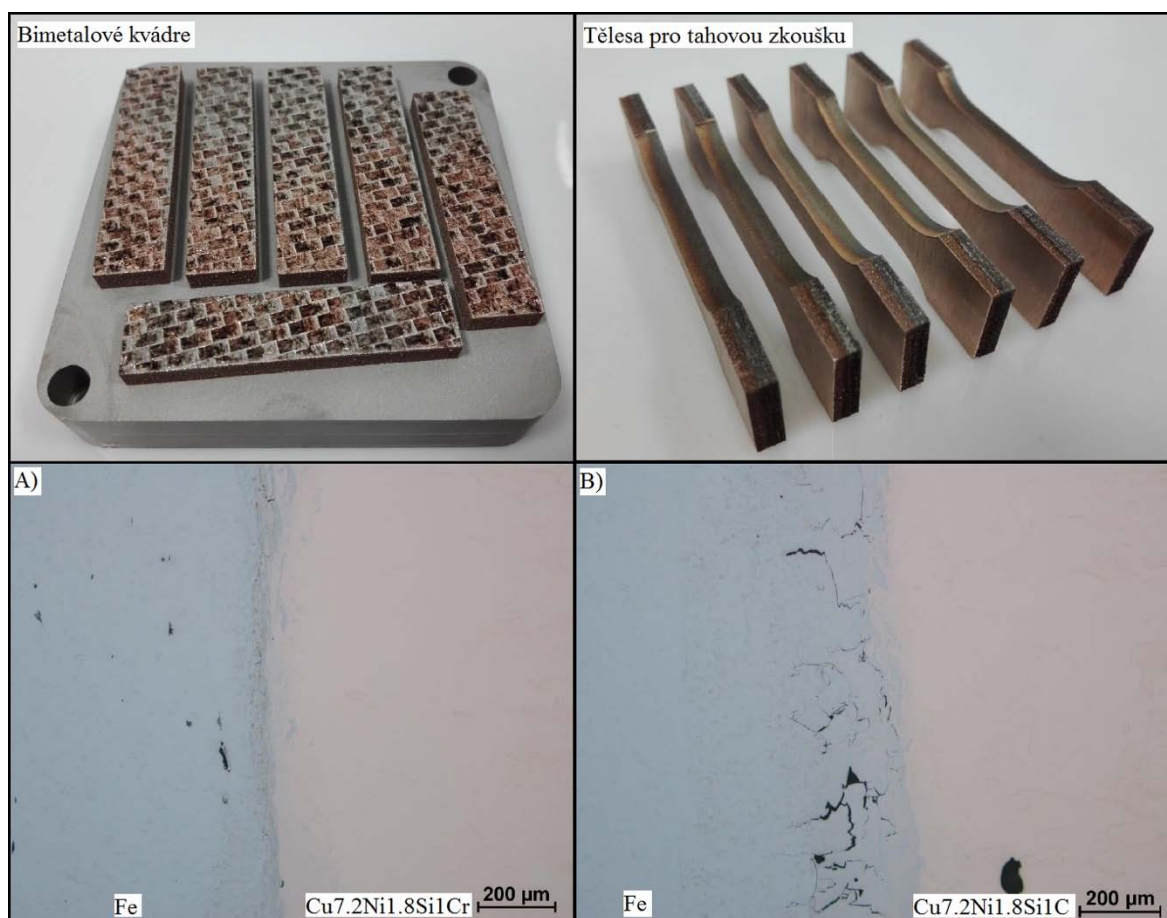


Obr. 2-8: Upravené nanášecí zařízení pro SLM280HL [13]



Obr. 2-9: Hlavní části upraveného nanášecího zařízení pro SLM280HL [13]

K testování upraveného nanášecího zařízení byla použita kombinace materiálů Fe a Cu7.2Ni1.8Si1Cr. Vyrobené byly bimetalové kvádry (viz Obr 2-10), ze kterých se následně pomocí drátové řezačky vyřezaly tvary tělísek pro tahovou zkoušku o rozměrech podle normy ASTM: E8/E8M-11 [13].



Obr. 2-10: Bimetallové kvádry, ze kterých byly zhotoveny tělíska pro tahovou zkoušku s průřezem v jednotlivých vrstvách vzorku [13]

2.3.2 Úprava zásobníku nanášече pro tvorbu multimateriálových dílů

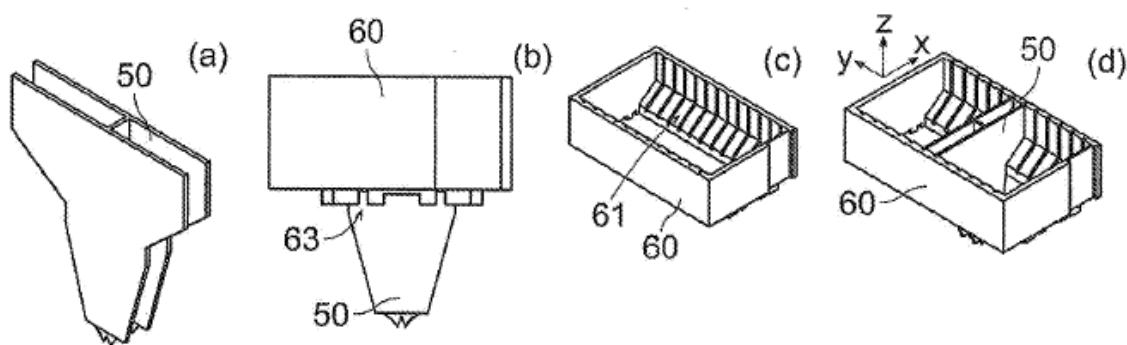
Název Patentu: Hopper for powder bed fusion additive manufacturing

Vlastník patentu: Nanyang Technological University

Číslo patentu: WO 2017/018935 A1

Datum udělení: 02.02.2017

Popis patentu: Patent popisuje upravený zásobník nanášече pro možnost multimateriálového tisku ve dvou osách. Změna v zásobníku, který již byl opomenut v kapitole (2.3.1) je provedena vložím speciálně vytvarovaného přídatného nadstavce (viz Obr. 2-11 a), který rozdělí zásobník materiálu na 6 komor (viz Obr. 2-14 d). S takovou úpravou je nanášеч schopný nanášet nejenom dva různé materiály v ose Z, jak bylo popsáno v kapitole (2.3.1), ale taky v ose Y, tedy ve směru pohybu nanášече [17].

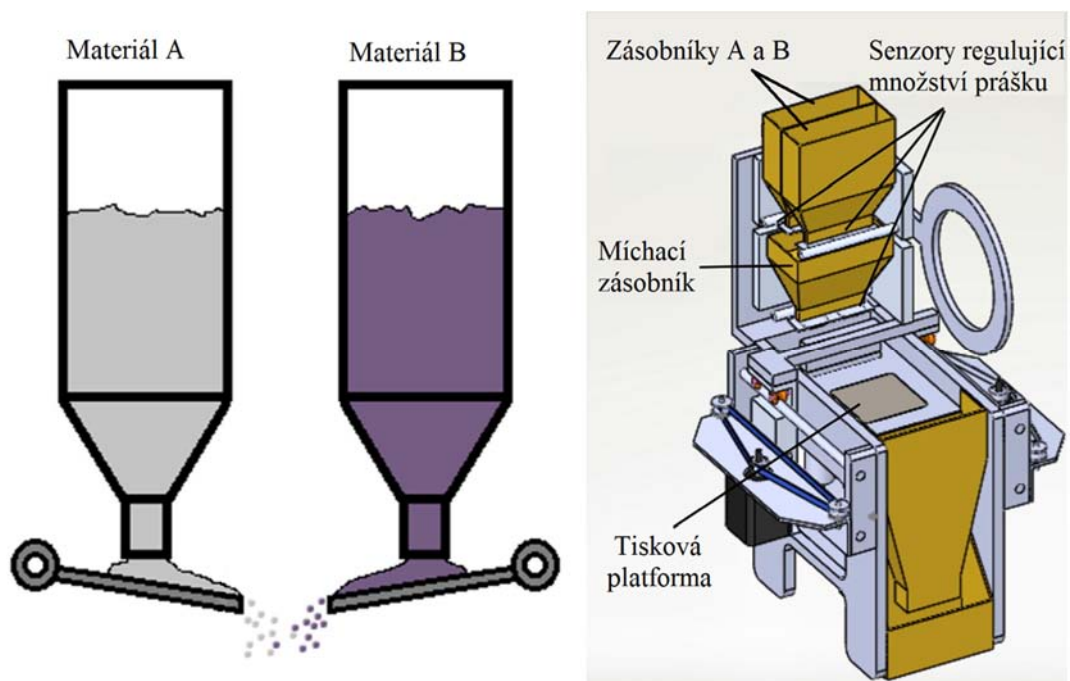


Obr. 2-11: Patent upraveného zásobníku nanášedce [17]

2.3.3 Úprava zásobníku nanášedce pro tvorbu gradientního přechodu

Pro vytváření gradientního přechodu mezi jednotlivými vrstvami je zapotřebí dosáhnout kvalitně promíchané směsi těchto dvou materiálů. Koncept nanášecího zařízení s možností aplikovat gradientní přechod s regulovaným poměrem jednotlivých prášků je znázorněn na (Obr. 2-12) [18].

Zařízení obsahuje dva zásobníky na materiál, pod kterými je umístěný třetí zásobník obsahující míchací mechanismus. Za pomoci senzorů je do míchacího zásobníku uvolněno požadované množství jednotlivých materiálů v požadovaném poměru. Ty jsou po důkladném promíchání nanášeny ve vrstvách přímo na tiskovou platformu. Tento koncept zařízení je schopen vytvářet pouze laminární součásti [18].



Obr. 2-12: Koncept nanášecího zařízení s míchacím mechanismem pro tvorbu gradientního přechodu [18]

2.3.4 Systém dávkování prášku

Název Patentu: Powder dispensing apparatus and method

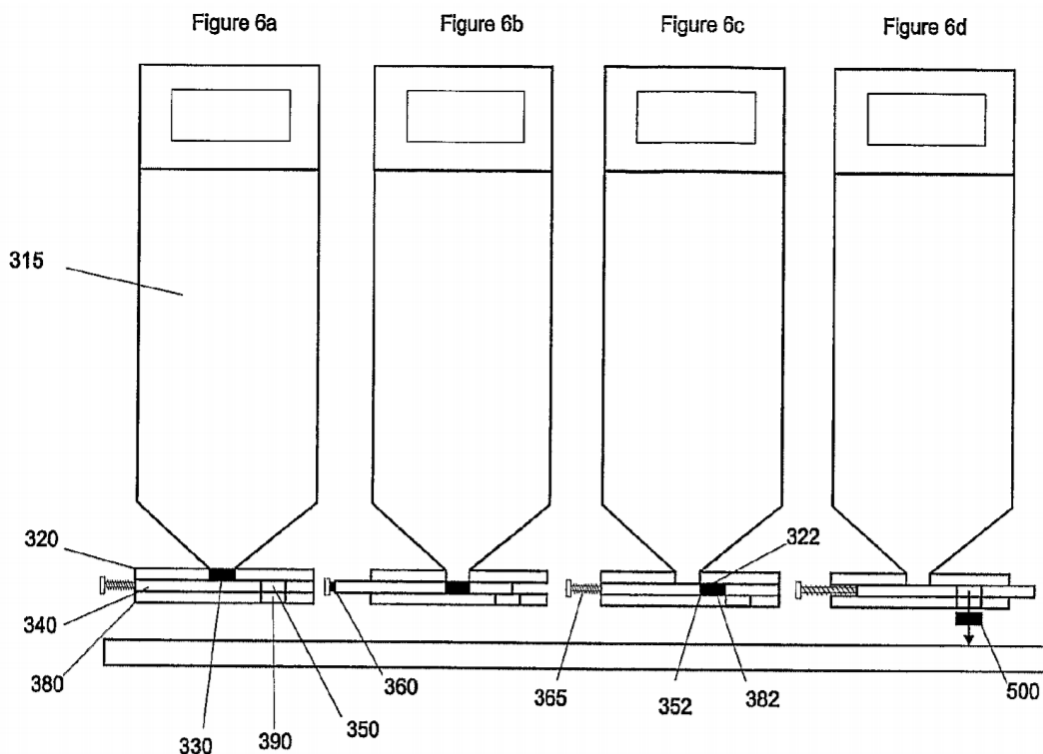
Vlastník patentu: MTT technologies limited

Číslo patentu: US 2014/0348969 A1

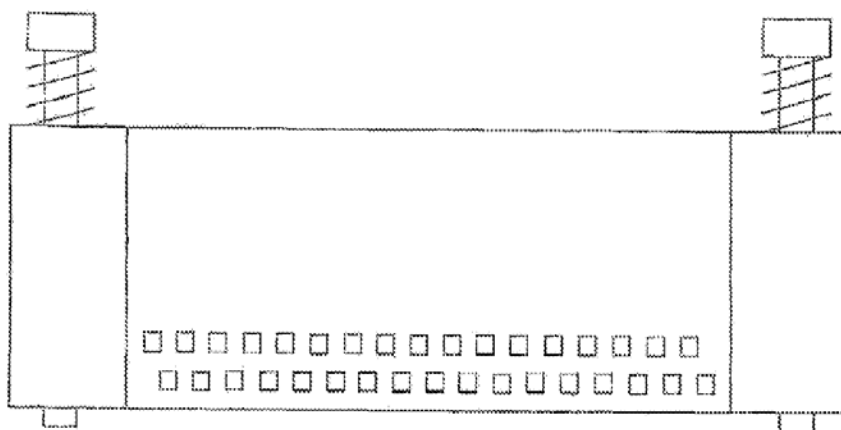
Datum udělení: 27.11.2014

Popis patentu: Tento patent popisuje zařízení pro možnost postupného dávkování přesného množství prášku na tiskovou platformu, přičemž dávka prášku musí být následně rozhrnuta pomocí nože nebo hřídele nanášeče na zadanou tloušťku vrstvy. Celé zařízení je uchyceno k nanášeči, aby byl zabezpečený souběžný chod dávkování a rozhrnutí [19].

Princip dávkování materiálu pomocí tohoto zařízení je popsán na (Obr. 2-13 a Obr. 2-14). Zásobník materiálu (315) obsahující práškový materiál dávkuje požadované množství tohoto materiálu skrze tři sendvičově stlačené desky. Desky (320) a (380) jsou v sendvičovém spojení nepohyblivé, přičemž deska (340) vykonává posuvný pohyb mezi nimi. První deska (320) obsahuje násypnou drážku (330), která je ze zásobníku vyplňována materiálem (viz Obr. 2-13 A). V prvním kroku se druhá deska (340), v které jsou vyrobeny přesné dávkovací díry (350) podle požadavků, podsune pod drážku (330) a dojde tak k zaplnění dávkovacích děr materiálem (viz Obr. 2-13 B a Obr. 2-14). V druhém kroku je druhá deska s drážkami zaplněnými materiálem posunuta nad výstupní otvor (390) (viz Obr. 2-13 C), skrze který za pomoci gravitace materiál propadne na požadované místo tiskové platformy (viz Obr. 2-13 D) [19].



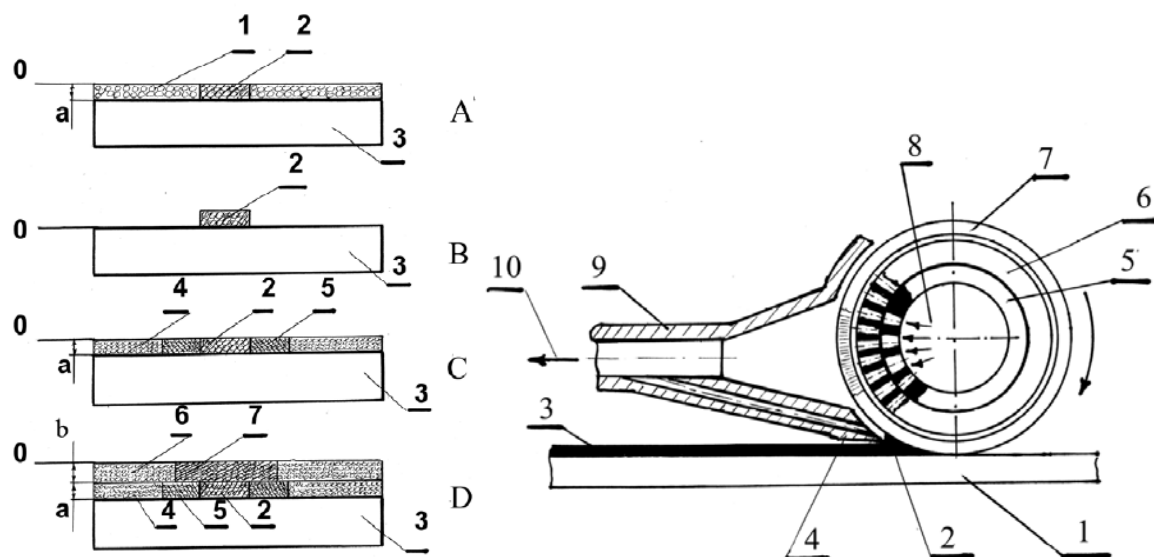
Obr. 2-13: Princip fungování systém nanášení přesného množství prášků [19]



Obr. 2-14: Ukázka posuvné desky (340), s přesnými dávkovacími dírami (350) [19]

2.3.5 Multimateriálový tisk za pomoci odsávání celé vrstvy prášku

Princip výroby multimateriálového tisku za pomoci odsávání prášku využívá odsávacího zařízení připevněného k rozhrnovací hřídeli (Obr. 2-15). Touto metodou jde podle autora nanášet více kovových prášků do jedné vrstvy. V prvním kroku tohoto procesu je nanesená vrstva prvního práškového materiálu a vypálí se požadovaný tvar v první vrstvě (viz Obr.2-15 A). V druhém kroku je za pomoci odsávacího zařízení odsán veškerý nevyužitý první prášek (viz Obr. 2-15 B). Třetím krokem je nanesení druhého prášku do stejné vrstvy a vypálení oblasti druhého materiálu (viz Obr. 2-15 C). Tento proces se může opakovat v každé vrstvě, a taky není problém použít víc než 2 materiály (viz Obr. 2-15 D) [3].



Obr. 2-15: Koncept zařízení, a princip výroby s postupem průběžného odsávání prášku [3]

2.3.6 Multimateriálový tisk za pomoci selektivního odsávání prášku

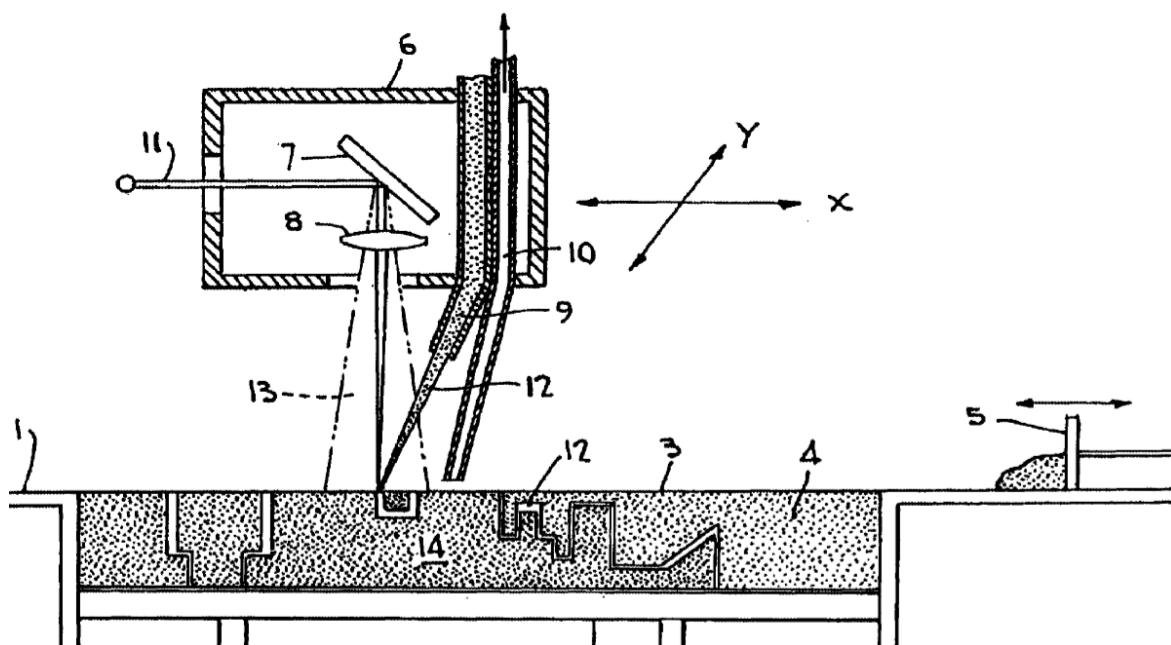
Název Patentu: Device and method for the preparation of building components from a combination of materials

Vlastník patentu: Fraunhofer ges Forschung

Číslo patentu: US 6861613 B1

Datum udělení: 01.03.2005

Popis patentu: Patent popisuje zařízení, které tvoří multimateriálovou vrstvu za pomoci selektivního odsávání (viz Obr. 2-16). Nejprve čepel (5) rozhrne na tiskovou plochu vrstvu prvního materiálu, která je následně v požadovaných místech vypálena laserem. Dále odsávací tryska (10) selektivně odsaje místa vrstvy, kde je požadované nanesení jiného materiálu. Druhý materiál je nanesen pouze do předem odsaných míst vrstvy za pomoci nanášecí trysky (12) [20].



Obr. 2-16: Náčrty patentu US 6861613 B1 [20]

2.3.7 Multimateriálový tisk za pomoci nanášedce a přídavné trysky

Název Patentu: Dual selective laser sintering and nonmetal and metal melting 3D (three-dimensional) printing system

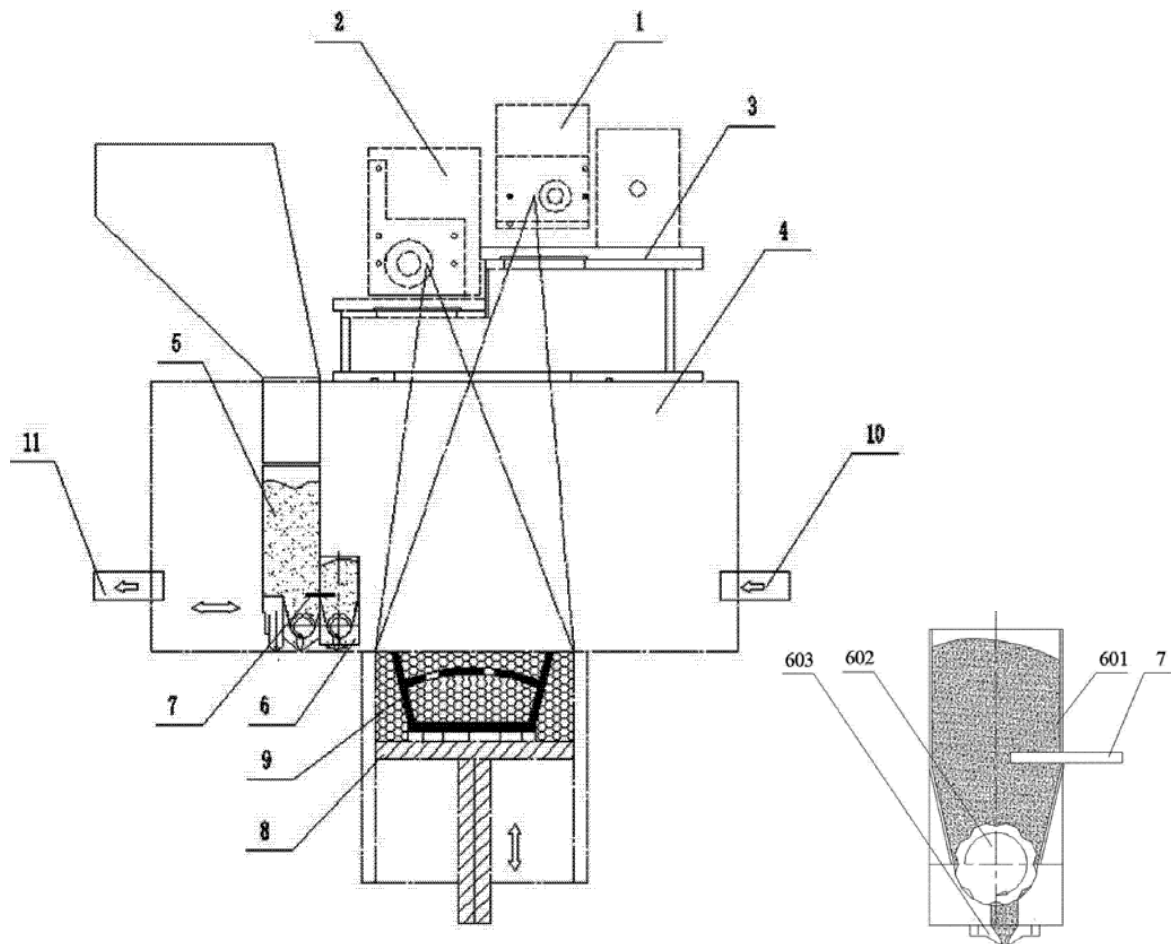
Vlastník patentu: Guanzhou OGGI3D Electromechanical CO LTD

Číslo patentu: CN 104923786 A

Datum udělení: 23.09.2015

Popis patentu: Nanášecí zařízení popsané v tomto patentu (viz Obr. 2-17) obsahuje

jeden standardní nanášec s čepelí (5) a jednu pohyblivou dávkovací trysku (6). Tryska, umístěná na čelní straně nanášече, selektivně nanáší první materiál na vybraná místa tiskové plochy. Za ní umístěný nanášec dávkuje a čepelí rozhrnuje druhý materiál do veškerých nezaplněných míst dané vrstvy. Zařízení dále obsahuje dva lasery různých výkonů (1,2), aby bylo možné pro tisk použít jeden kovový a jeden nekovový materiál [21].



Obr. 2-17: Náčrten patentu CN 104923786 A [21]

2.3.8 Aerosint – Prototyp multimateriálové tiskárny SLM

Název Patentu: Device and method for manipulating particles

Vlastník patentu: AEROSINT SA

Číslo patentu: WO 2018/059833 A1

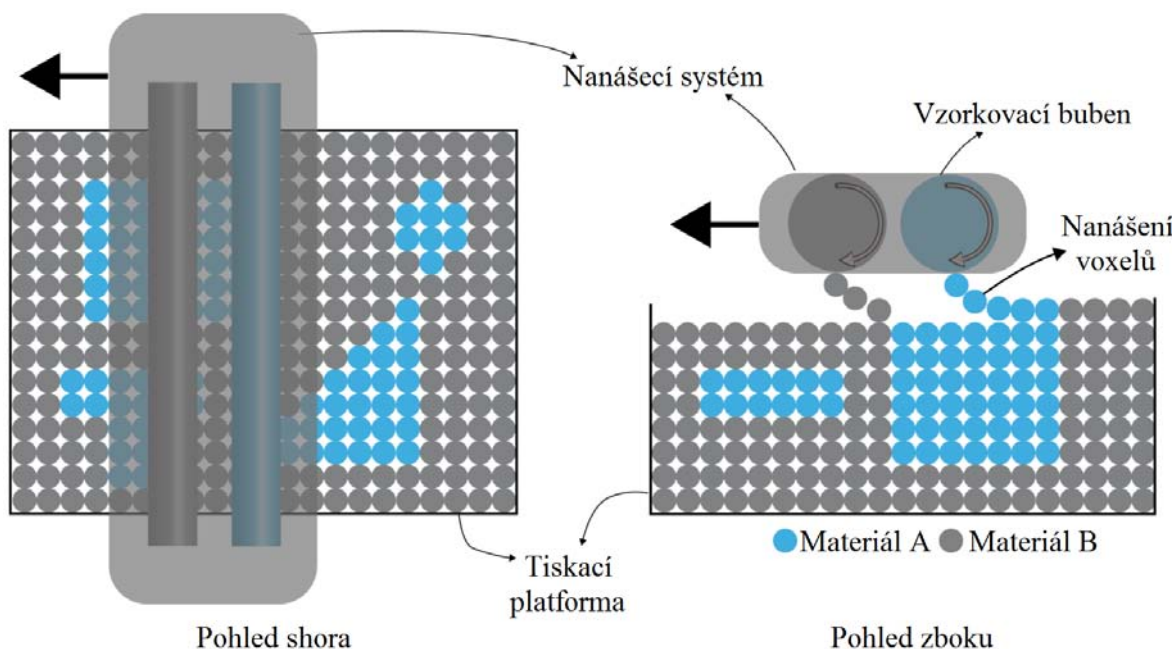
Datum udělení: 05.04.2018

Popis patentu: Společnost Aerosint vynalezla jedinečnou technologii selektivního nanášení prášku za pomoci vzorkovacího bubnu, který je schopný ukládat prášek jenom do zadaných bodů „voxelů“ nanesené vrstvy. Tiskárna může obsahovat více vzorkovacích bubnů (jeden buben pro každý typ materiálu). Nanášecí systém tedy dokáže nanést vrstvu

prášku připravenou pro selektivní laserové tavení a složenou z více než jednoho materiálu. Tiskárna podporuje veškeré materiály používané pro selektivní laserové tavení nebo Slinování (plast, kov nebo keramika) [22,23].



Obr. 2-18: Ukázka multimateriálově nanášené vrstvy tiskárnou Aerosint [22]



Obr. 2-19: Koncept nanášečícího zařízení použitého v patentu společnosti Aerosint [22]

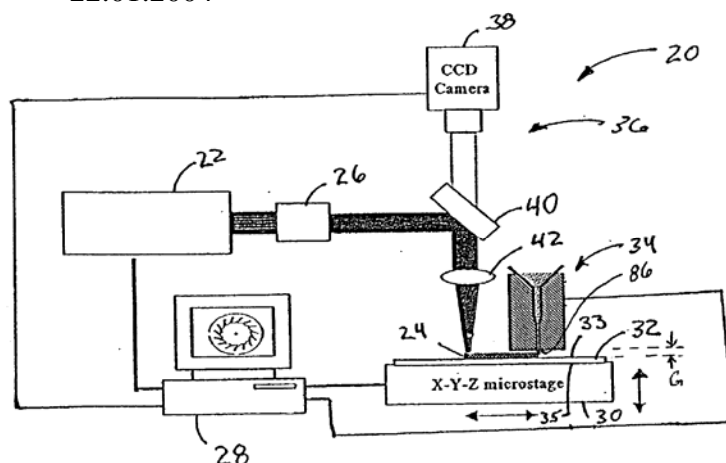
2.3.9 Dávkovací systém s pipetou

Název Patentu: Apparatus and method of fabricating small-scale devices

Vlastník patentu: LI XIAOCHUN, YANG YONG, CHOI HONGSEOK

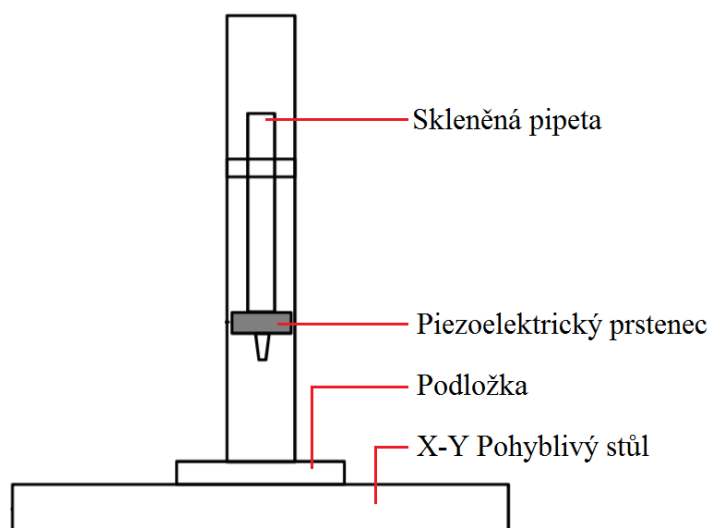
Číslo patentu: US 2004012124 A1

Datum udělení: 22.01.2004



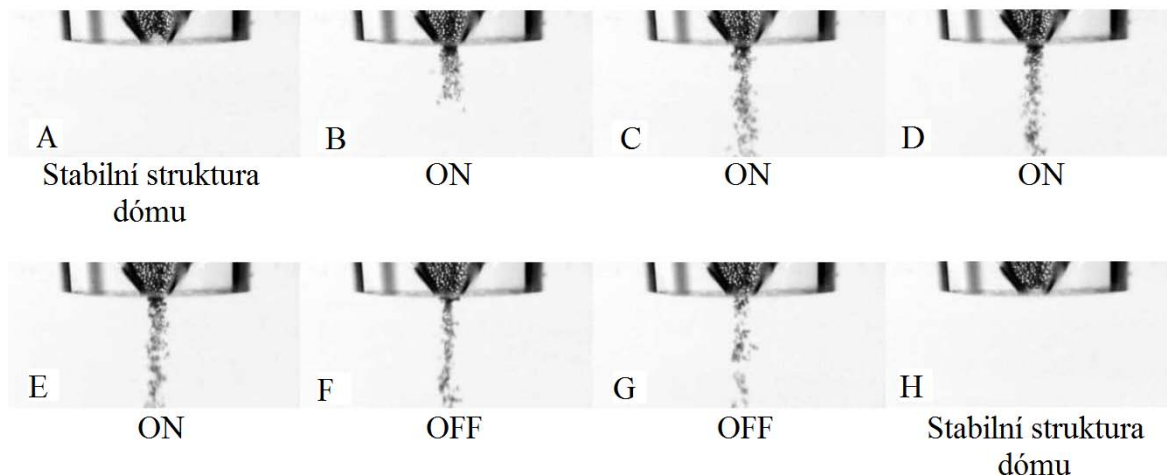
Obr. 2-20: Nákres patentu US 2004012124 A1 [25]

Experiment, který byl úspěšně vykonán na universitě v Southamptonu, přináší velmi zajímavou možnost bodového nanášení prášku na tiskovou plochu. Dávkovací zařízení (viz Obr. 2-21) se skládá ze skleněné pipety, která je pevně uchycená na konstrukci zařízení, piezoelektrického prstence přilepeného na spodním konci pipety a pohyblivého stolu s tiskovou podložkou. Proces dávkování probíhá tak, že práškový materiál je nasypán do skleněné pipety, ve které si díky kónickému zúžení na výstupu vytvoří stabilní strukturu dómu a je dávkován až za pomoci vibrací vytvořených piezoelektrickým prstencem [24].



Obr. 2-21: Schéma experimentálního dávkovacího zařízení s pipetou [24]

V průběhu dávkování vibrace vyvolané piezoelektrickým prstencem přenáší energii skrze sklo pipety do částic v stabilní struktuře dómu, což má za následek jeho zborcení (viz Obr. 2-22) [24].

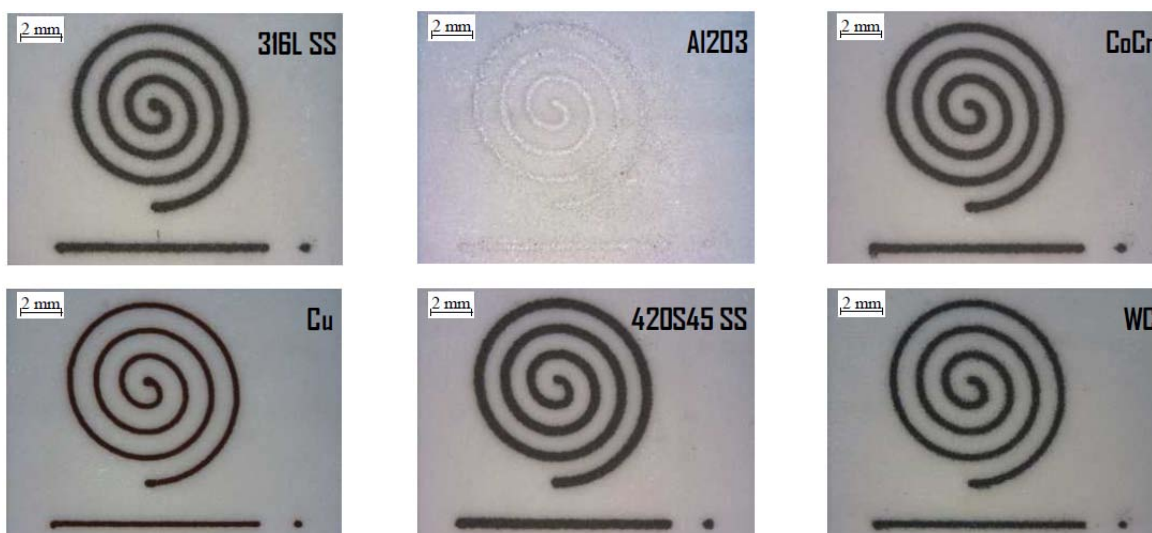


Obr. 2-22: Sekvenční snímky zachycené vysokorychlostní kamerou na 0.01 sekundy od spuštění piezoelektrického prstence (B) až po jeho vypnutí (F) [24]

Experiment vyhodnocoval 10 různých materiálů, při kterých pracoval s parametry jako průměr výstupu pipety, napětí signálu, vzdálenost mezi pipetou a podložkou a rychlost pohybu. Pro testované materiály byly dále hledány nejvhodnější parametry pro nanášení [24].

Tab. 2-1: Fyzikální charakteristiky vybraných materiálů z experimentu [24]

Materiál	316L SS	Al2O3	CoCr	Cu	420S45 SS	WC
D ₅₀ [μm]	32	52	18	14	20	35
Hustota částic [kg/m ³]	7740	3970	8290	8940	7740	15500

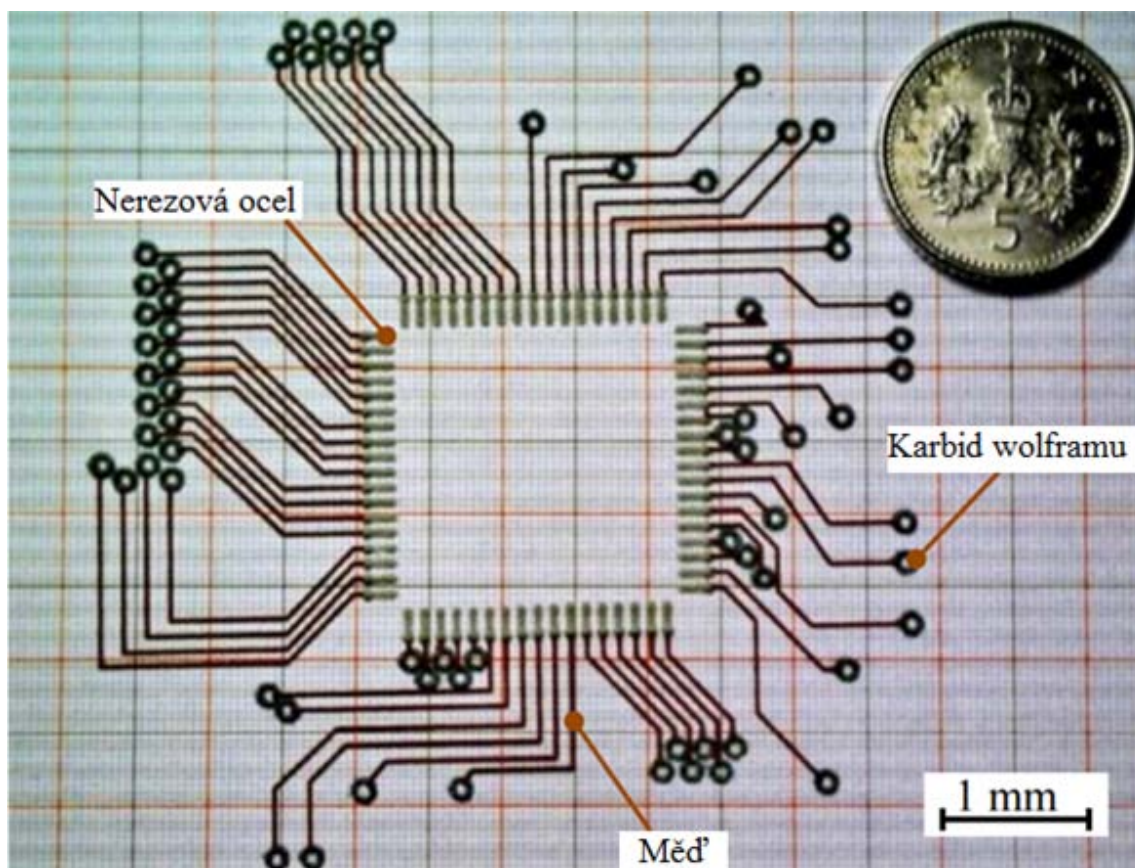


Obr. 2-23: Výsledky experimentu nanášení prášku skrze pipetu [24]



Obr. 2-24: Vzorky o šířce dráhy 85 μm , vytvořené s parametry: Průměr vývodu pipety 60 μm , Vzdálenost pipety od podložky 150 μm , rychlost tisku 5 mm/s, elektrické napětí 2 V [24]

Tenhle způsob nanášení práškového materiálu poskytuje velkou úroveň detailu (viz Obr. 2-24), a taky možnost použití více materiálů najednou (viz Obr. 2-25). Pro použití více materiálů je zapotřebí více nanášecích pipet s nezávisle řízenými piezoelektrickými prstenci [24].



Obr. 2-25: Schéma nanesená z různých materiálů [24]

2.3.10 Nanášecí válec rozdělený na prstence

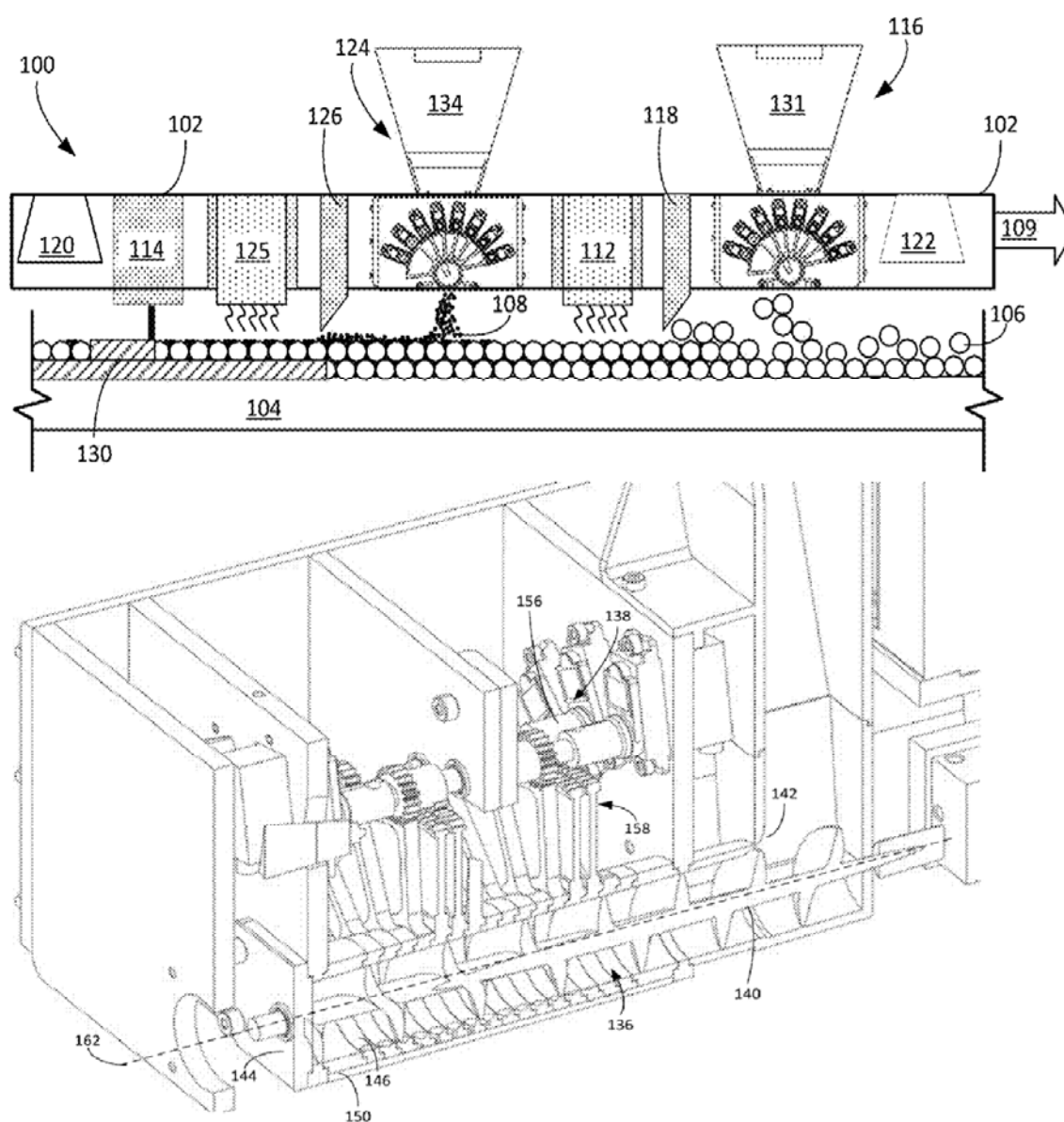
Název Patentu: Powder delivery for additive manufacturing

Vlastník patentu: Hou T. Ng, Raanan Zehavi, Nag B. Patibandla

Číslo patentu: US 2017/0072636 A1

Datum udělení: 16.03.2017

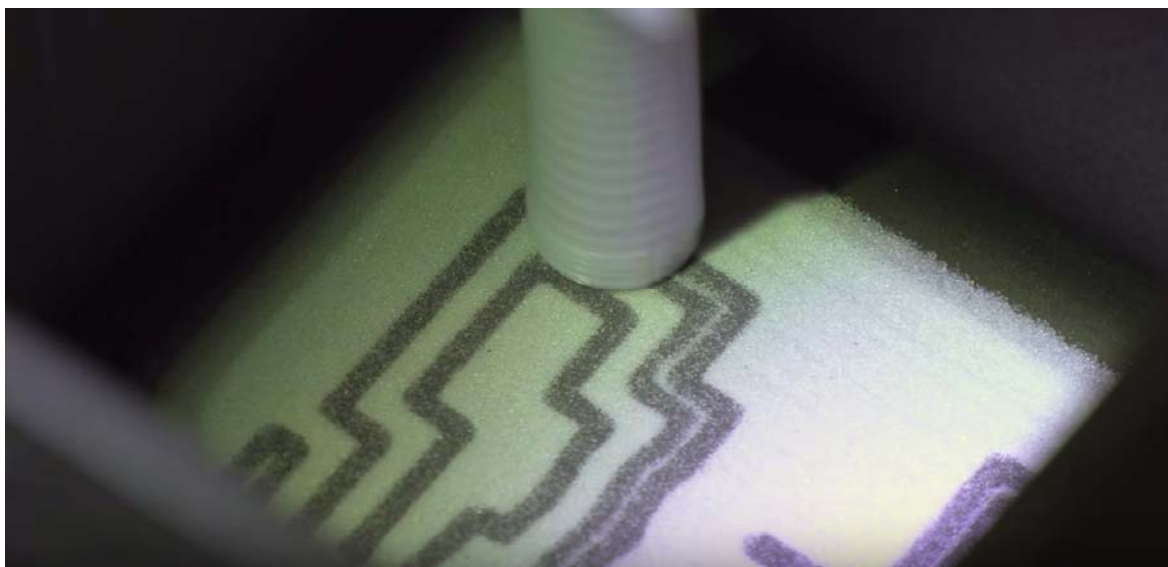
Popis patentu: Zařízení pro selektivní nanášení prášku (viz Obr. 2-26) má nanášecí válec rozdělený na mnoho malých prstenců (146), přičemž každý z nich je nezávisle otočně ovládán pomocí ozubených převodů (158). Každý prstenec tedy zodpovídá za nanášení voxelů ve svém řádku a program reguluje, kdy je prstenec otevřen (nanáší materiál), a kdy zavřen (nenanáší materiál). Pro každý materiál je nutné mít samostatný nanášecí válec s individuálním ozubeným převodem pro každý jeden prstenec [26].



Obr. 2-26: Náčrty patentu US 2017/0072636 A1 [26]

2.3.11 Iro3D – Prototyp multimateriálové tiskárny

Iro3D je prototyp multimateriálové tiskárny, která k selektivnímu nanášení materiálu využívá trysku obsahující šnekový mechanismus (viz Obr. 2-27). Tiskárna jednotlivé vrstvy nevypaluje, ale jenom nanáší vrstvu na vrstvu. Pro dosažení finálního produktu je tedy nutné takhle naskládáný materiál vložit do pece a roztavit daný materiál [27].



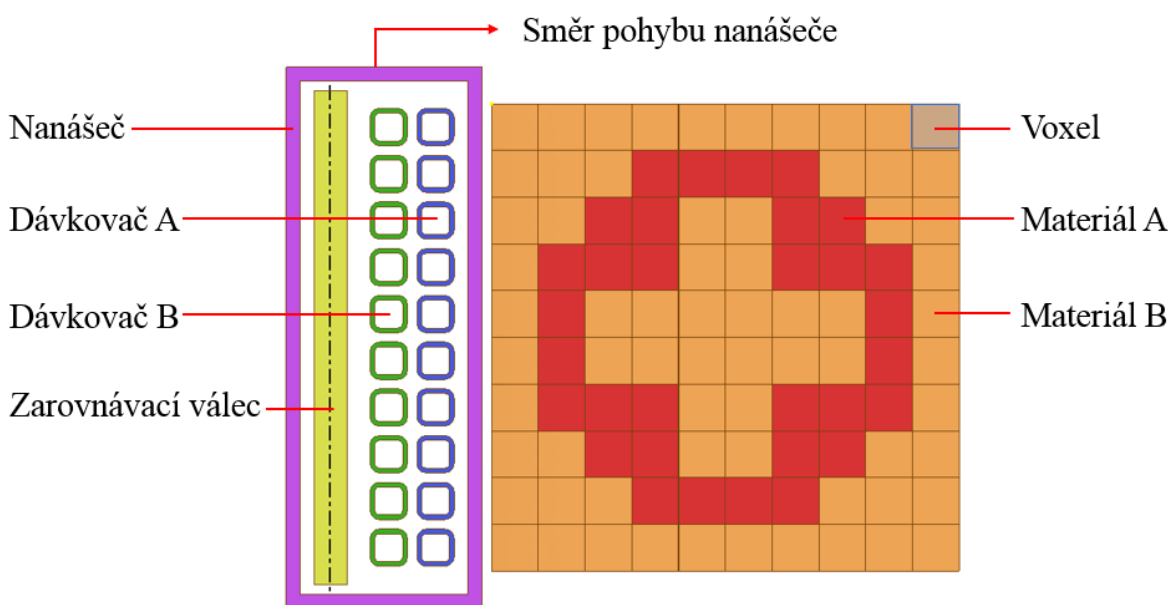
Obr. 2-27: Nanášení práškového materiálu skrze trysku s šnekovým mechanismem [27]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Použití více než jednoho materiálu v průběhu procesu výroby aditivní technologií selective laser melting (SLM) nebylo doposud nijak významně prozkoumáno. Průmyslové aplikace využívající multimateriálové kovové spoje komplexního tvaru či komponenty složitých tvarů kombinované z více kovových materiálů jsou značně omezené technologiemi umožňujícími spojení (svařování, lepení) o definované pevnosti. Použití více kovových materiálů a ověření pevnosti materiálového rozhraní by významně rozšířilo aplikační možnosti aditivních technologií. Navržením nanášecího zařízení, schopného nanášet více než jeden kovový prášek, by se otevřely nové možnosti pro různé experimenty s multimateriálovým tiskem.

Při navrhování konstrukce nanášecího zařízení bude brán zřetel na více problematických úseků. V rámci primárního výzkumu se testovací nanášecí zařízení sestojí externě mimo tiskárnu. Zařízení bude prozatím navrženo na tvorbu pouze jedné vrstvy. Vyhodnocovat se bude schopnost nanášet voxely a celistvé tvary z různých prášků tak, aby jejich přechod dosahoval uspokojivých výsledků. Jelikož na tiskárnách pro selektivní laserové tavení vykonává pohyb v ose Z stůl tiskárny, pro tvorbu jednotlivých vrstev multimateriálového dílu nebude nutno upravovat nanášec, ale nové zařízení se implementuje do vodícího systému tiskárny. Následně bude zapotřebí otestovat schopnost nanesení práškové vrstvy na předchozí nanesenou vrstvu tak, aby nedošlo k výraznému poškození spodní vrstvy.



Obr. 3-1: Schéma rozdělení tiskové plochy a koncept nanášecího zařízení

Při rozdělení tiskové plochy na dílky „voxely“ bude důležité minimalizovat mezery na přechodech, nebo ostrých hranách. Je nutno zvolit takový tvar a velikost nanášených voxelů, který bude vykazovat akceptovatelné propojení prášků mezi sousedícími voxely. Při volbě velikosti voxelu musí být brán v úvahu navržený pohybový mechanismus nanášecího zařízení, aby jeho minimální posuv dokázal obsáhnout veškeré virtuální pozice voxelů. Pro testování nanášení více materiálů budou muset být nejprve definovány vhodné nanášecí parametry pro každý použitý materiál, jelikož každý materiál má odlišné vlastnosti.

3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Z první části rešerše zabývající se samotnou technologií selektivního laserového tavení (SLM) a aktuálním vývojem multimateriálového tisku touto technologií vyplývá, že jelikož se stále jedná o neprobádanou oblast, tato technologie má před sebou ještě mnoho úskalí. Komplikace ve výrobě nastávají zejména v oblastech přechodu mezi dvěma prášky, z důvodu jejich rozdílných vlastností. Přechod mezi prášky je možné tvořit buď diskrétně, anebo gradientně. Pro kvalitnější propojení dvou materiálů je lepší využít gradientního přechodu, avšak jeho výroba je v porovnání s diskrétním přechodem o hodně náročnější.

Z druhé části rešerše zabývající se možnými způsoby nanášení prášku vyplývá, že v dnešní době se pro komerční 3D tiskárny využívají převážně násypky prášku pouze s dvěma druhy rozhrnovacích systémů, a to válec, nebo čepel.

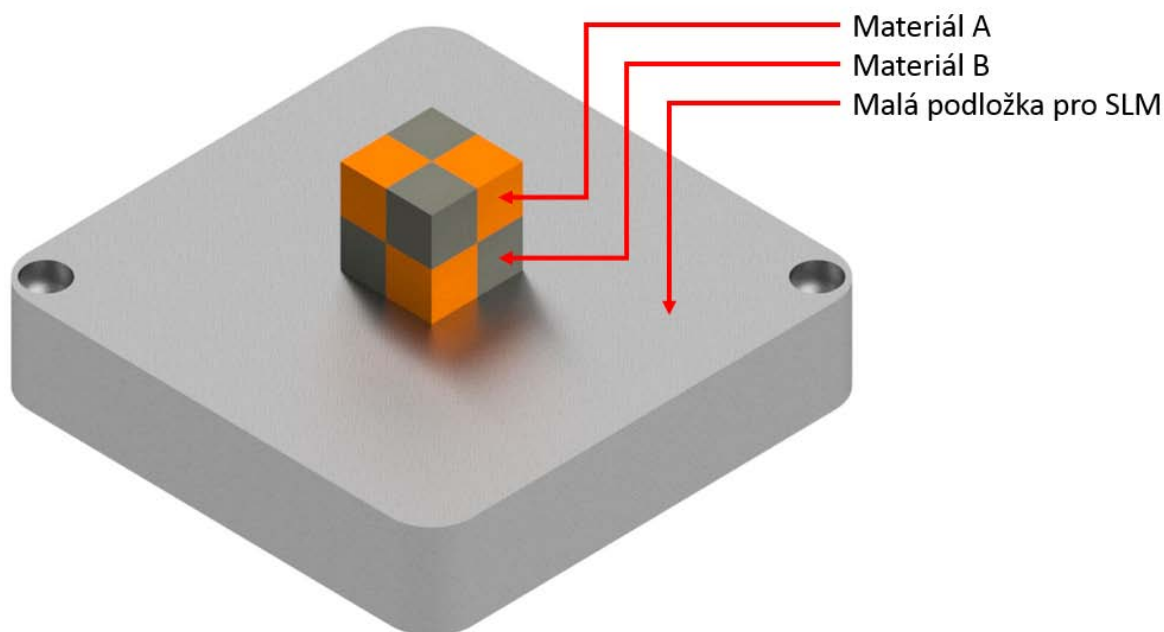
Pro multimateriálový tisk, kterého chceme dosáhnout, není možné využívat pouze stávajícího mechanismu. První možností je úprava nanášeče za pomoci příček, kterou však dosáhneme možnost tvorby multimateriálového dílu pouze ve dvou osách. Druhou možností je implementace odsávacího zařízení. Odsávání by se mohlo namontovat na upravený nanášeč s příčkou, přičemž je zapotřebí experimentálně testovat vlastnosti odsávání prášku. Jelikož každý materiál má jiné fyzikální vlastnosti, bylo by zapotřebí testovat, jak velkou odsávací sílu bychom pro požadovaný materiál potřebovali, abychom odsáli pouze požadovanou jednu vrstvu prášku, a ne taky další vrstvy pod ní. Dále by bylo zapotřebí testovat různé velikosti odsávacích otvorů a jejich vliv na odsátý region prášku. Třetím způsobem je vytvoření nového nanášeče, který se osadí do originálního vedení stroje SLM 280HL. Nový nanášeč se může inspirovat uzly stávajících prototypů tiskáren jako jsou AEROSINT nebo Iro3D, přičemž ne všechny uzly jsou použitelné z důvodu jejich komplexnosti.

Dávkovací systém s pipetou, je schopen nanášet zajímavé tvary s přijatelnou kvalitou nánosu. Tento jednoduchý systém je schopen nanášet velice malý rozměr voxelu, což je v našem případě žádoucí pro minimalizaci mezer mezi voxely. Dále způsob dávkování za pomoci pouze piezoelektrického kroužku a gravitace může být velkým benefitem při tvorbě vrstvy prášku na již nanesenou vrstvu. Z hlediska originality tvořeného nanášecího zařízení

je však nutno brát v úvahu taky veškeré omezení vyplývající z tohoto patentu, a to především protože patent zahrnuje dávkování materiálu skrze kapiláru pomocí vibrace z externího zdroje. Proto by bylo eventuálně možné mírně pozměnit tento systém tak, aby dosahoval stejných výsledků použitím jiných komponent.

3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Cílem této diplomové práce je navržení a sestrojení nanášecího zařízení, které bude schopné selektivně nanášet dva rozdílné kovové prášky do jedné nanášecí roviny. Implementací tohoto nanášecího zařízení bude možno docílit změny materiálu ve všech třech osách (viz Obr. 3-2), které doposud nejsme schopni dosáhnout žádným jiným komerčním nanášečem a dosáhnout tak větší variabilnosti 3D tisku v technologii selektivního laserového tavení (SLM). Navržené zařízení, bude sloužit pro výzkumné účely a bude kompatibilní s 3D tiskárnou SLM 280HL, která se nachází na ústavu konstruování fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. V průběhu procesu tisku je zapotřebí udržovat v komoře tiskárny inertní atmosféru, a proto musí být veškeré prvky vedoucí od nanášecího zařízení ven z tiskárny náležitě utěsněny. Sestrojeným nanášecím zařízením bude ověřen koncept nanášeče s pipetou a otestují se první výtisky nanesené multimateriálové vrstvy. Na vytisknuté multimateriálové vrstvě může být následně vykonána analýza a výzkum multimateriálového rozhraní pro další akademické účely.



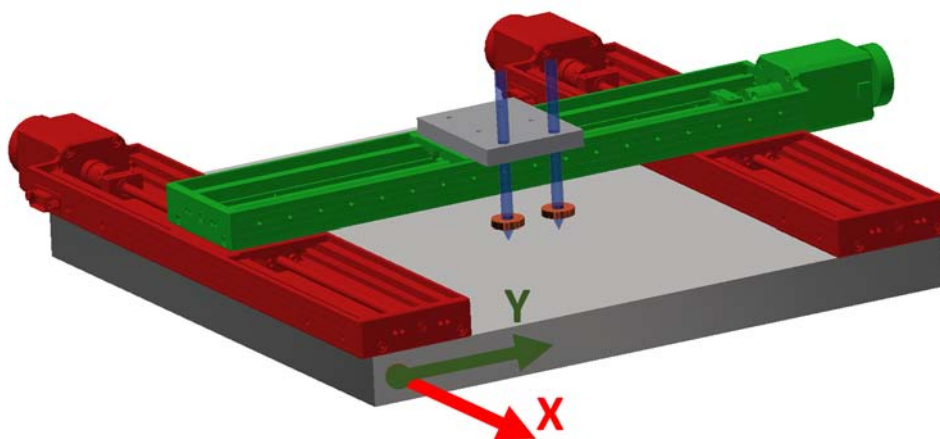
Obr. 3-2: Ukázka možného multimateriálového dílu pro ověření změny materiálu ve všech třech osách

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Rozbor koncepčního řešení

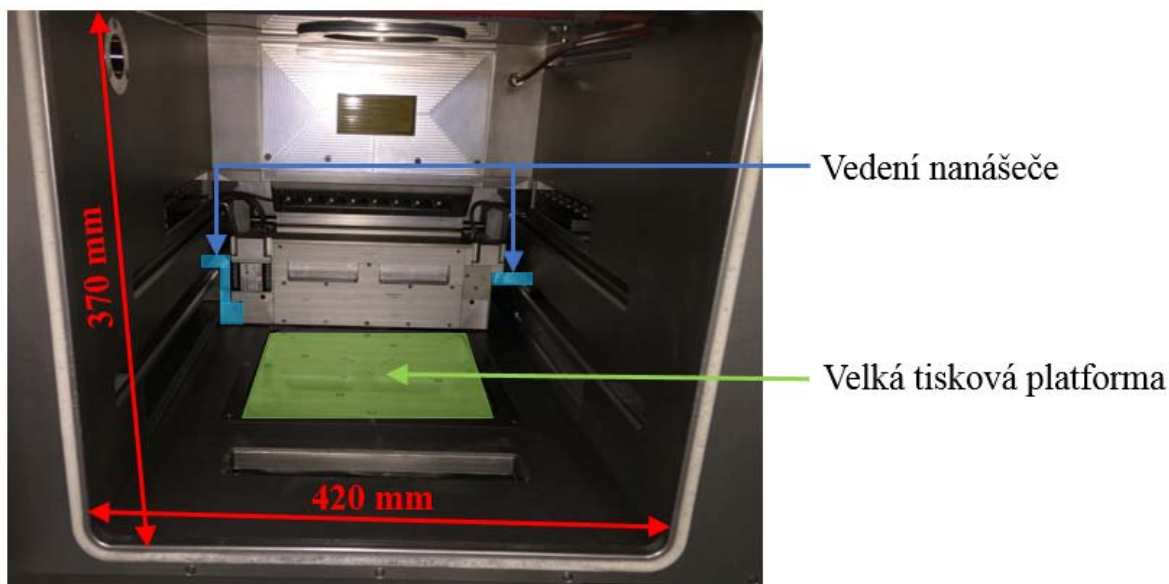
Pro primární testování se sestrojí externí nanášecí zařízení, které bude pracovat mimo tiskárnu SLM 280HL. Zjednoduší se tak konstrukce nanášecího systému na tvorbu pouze jedné vrstvy materiálu, tudíž pohybové vedení nanášecí hlavičky bude pouze v osách „x“ a „y“. Odsazení hlavičky od platformy, na kterou se bude nanášet, zůstane stejné. Je zapotřebí věnovat pozornost volbě vhodného pohybového vedení a ovládacího systému, aby bylo možno pracovat na celé ploše definované platformy. Jako vedení můžou být použité například lineární osy (viz Obr. 4-1). Pro nanášecí hlavičku bude využitý mechanismus dávkovacího systému s pipetou, který je blíže popsán v kapitole (2.3.9). Pro začátek, bude hlavička testovacího zařízení obsahovat pouze dvě pipety, přičemž každá z nich bude nanášet jiný materiál. Bude vytvořen jednoduchý dvou-materiálový referenční model, který bude mít G-kód pro všechny testy stejný, aby bylo možné jejich vizuální porovnání. Materiály pro testování budou zvolené na základě jejich dostupnosti. Testovat se bude schopnost bodového a kontinuálního nanášení pipet umístěných v řadě za sebou. K dokumentaci dosažených výsledků nanášené vrstvy se použije digitální mikroskop VHX-5000.

Na základě výsledků z vykonaných experimentů bude navržen vhodný průměr a množství pipet, které bude finální nanášecí zařízení obsahovat. Podle počtu a umístění pipet se navrhne vhodný způsob přívodu práškového materiálu ze zásobníku. V průběhu návrhu konstrukce musí být brán zřetel na volbu materiálů pro výrobu jednotlivých dílů, které budou v kontaktu s práškem. Takto navržené nanášecí zařízení se následně implementuje do stroje SLM 280HL.

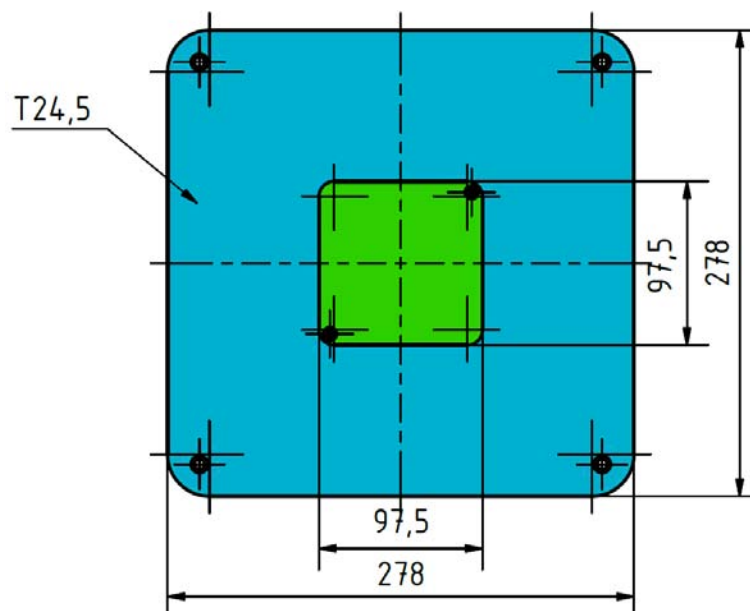


Obr. 4-1: Koncepční návrh přesného vedení testovacího zařízení s dvěma pipetami

Nanášecí zařízení navrhované pro tiskárnu SLM 280HL může být provedeno dvěma způsoby. První možností je navržení nanášecího zařízení, které bude upevněné ke stávajícímu vedení nanášeče (viz Obr. 4-2), a bude tak moci k nanášení využívat celou velikost pracovního prostoru (278 mm x 278 mm) poskytovaného tiskárnou (viz Obr. 4-3). Přičemž posuv ve směru vedení bude ovládán řídicím panelem tiskárny, ale samotné nanášení prášku pomocí jednotlivých nanášečů bude řízené externím ovládáním.



Obr. 4-2: Možnosti implementace nanášecího zařízení do tiskárny SLM 280HL a rozměry dveří tiskárny



Obr. 4-3: Možné velikosti pracovních prostorů tisku ve stávající tiskárně SLM 280HL

Druhou možností je uchycení nového vedení nanášecího zařízení naznačeného v koncepčním návrhu (viz Obr. 4-1) na velkou tiskovou platformu (viz Obr. 4-2), která by pro tento účel prošla konstrukční úpravou. V tomto případě by však bylo možné k nanášení

využívat pouze zmenšeného pracovního prostoru o rozměru (97,5 mm x 97,5 mm) (viz Obr. 4-3). Pro tuto možnost provedení by celý proces nanášení prášku, i posuvu nanášeče řídil externí ovladač, přičemž tiskárna by řídila pouze inertní atmosféru a laser.

Výsledné parametry tisku se budou odvíjet od zvolené konstrukce nanášeče a možností zařízení SLM 280HL. Tato tiskárna standardně pracuje s výškou vrstvy 50 μm a výkon její laseru je 400 W.

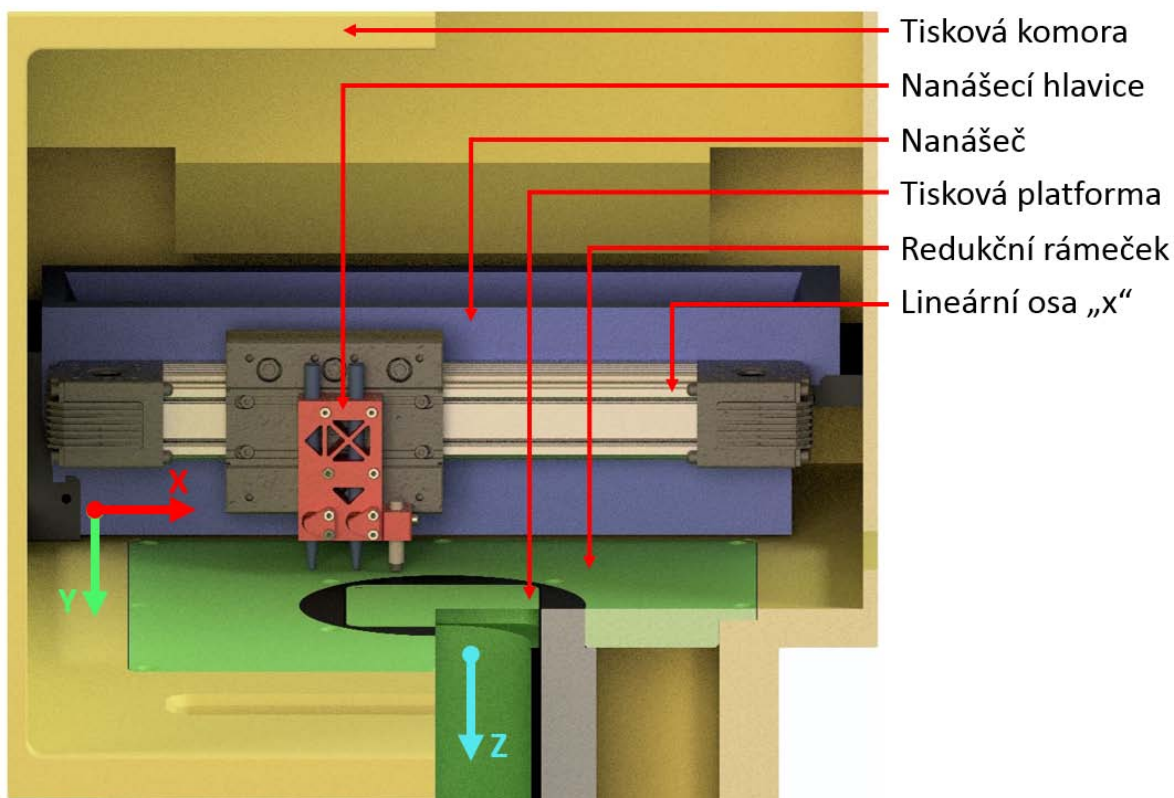
4.2 Externí nanášecí zařízení

Pro možnost testování nanášecí hlavice mimo tiskárnu SLM 280HL je zapotřebí externí zařízení disponující pohybovým vedením a ovládacím systémem. V článku S. Chianrabutra [24] bylo za tímto účelem využito dvou komponent. Přesného pohybového stolku pro vodorovný pohyb tiskové platformy v rovině „xy“, a nezávislý pohybový sloup v ose „z“, který je nosným členem nanášecí pipety.

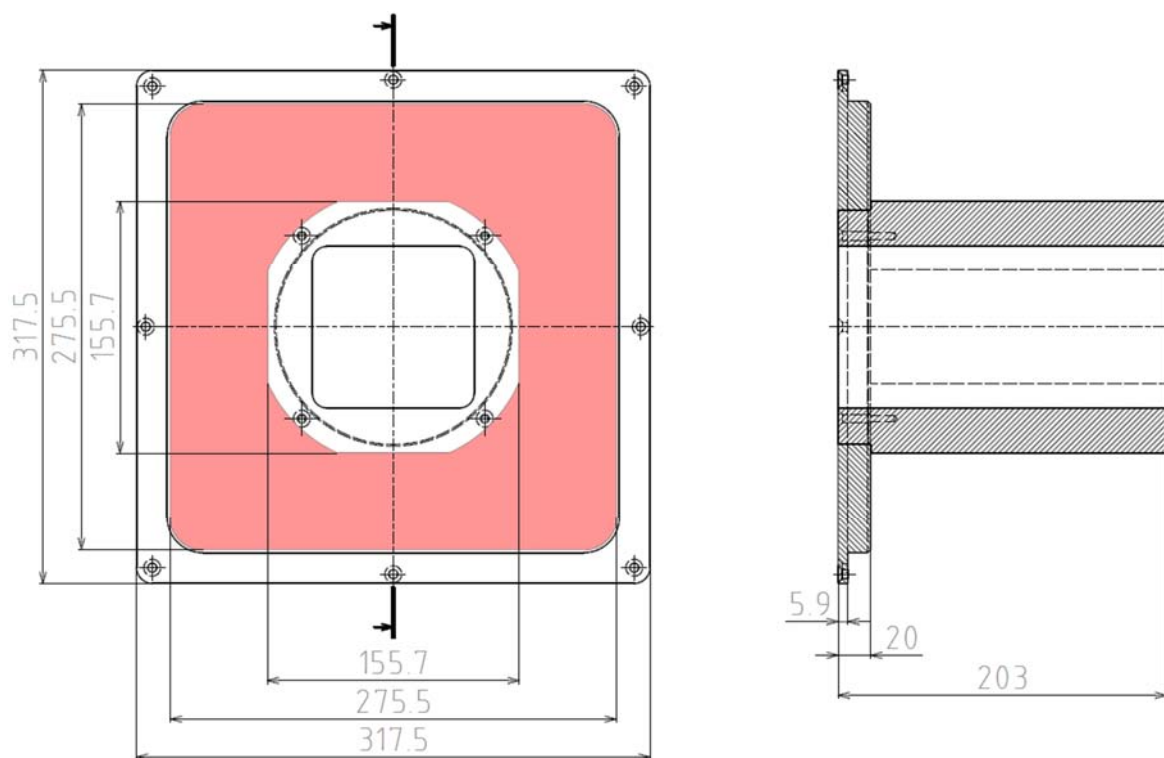
Pro tuto aplikaci se naskytuje možnost použití malých nízkonákladových 3D tiskáren pracujících s technologií FDM, které již disponují veškerými potřebnými komponentami a softwarem. Tyto tiskárny jsou cenově dostupné, a jejich přestavba na externí testovací zařízení nevyžaduje mnoho úprav.

4.3 Možnosti implementace vedení do komory tiskárny SLM 280HL

Jak už bylo napsáno na začátku (viz Kapitola 4), uchycení nového nanášecího zřízení do tiskárny SLM 280HL je možné dvěma způsoby. Uchycením ke stávajícímu vedení nanášeče, nebo uchycením na velkou tiskovou platformu. Každá z těchto možností má svoje výhody ale i omezení. Použitím stávajícího vedení tiskárny by bylo možné zachovat aktuální systém nanášení celistvé vrstvy jednoho prášku, který by byl doplněn o lineární osu ve směru „x“, sloužící k selektivnímu nanášení vrstvy (viz Obr. 4-4). Lineární osa slouží jako nosný prvek pro nanášecí hlavici. Problémem této varianty je nekompatibilita ovladačů. Jestliže, využijeme vedení tiskárny, budeme tak ovládat posuvy ve směru osy „y“ pomocí hlavního ovladače tiskárny, ale posuvy ve směru osy „x“ skrze druhý, externí ovladač s Arduinem. Toto rozdělení není praktické k testování a ani k celkové tvorbě řídicího G-kódu sloužícího k rychlému určování přesných poloh v průběhu nanášení jednotlivých vrstev.



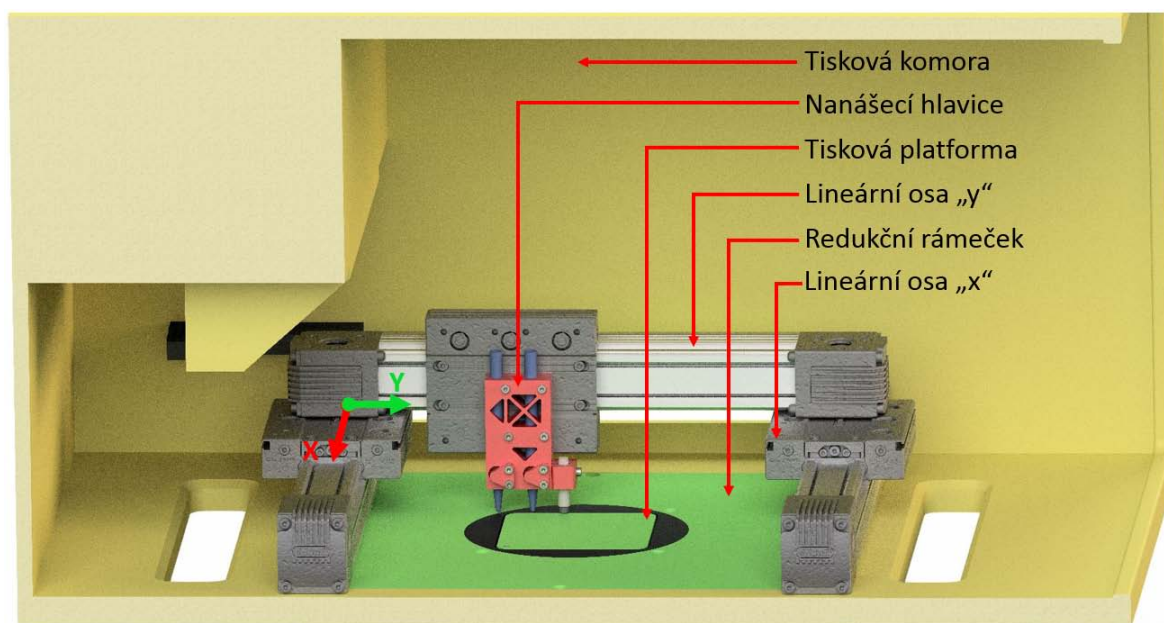
Obr. 4-4: Koncepční řešení implementace vedení nanášecí hlavice s využitím stávajícího vedení nanášeče tiskárny SLM 280HL



Obr. 4-5: Redukční rámeček tiskárny SLM 280HL s vyznačeným nevyužitým prostorem pro možnost montáže pohybových mechanismů

Druhou možností je uchycení lineárních os do prostoru velké tiskové platformy. V procesu, kdy se provádí tisk na malou tiskovou platformu, se velká platforma nahrazuje tzv. redukčním rámečkem, který slouží k vyplnění nevyužitého prostoru platformy. Montážní otvory rámečku a taky všechny nevyužitý prostor (viz Obr. 4-5), se proto může použít k upevnění lineárních os, nebo dalších komponentů potřebných ke konstrukci nového nanášecího systému. Konceptní řešení tohoto provedení by obsahovalo tři lineární osy (viz Obr. 4-6). Dvě z nich jsou umístěné rovnoběžně s dveřmi komory tak, že nebrání proudění inertní atmosféry v průběhu procesu a slouží jako symetrická podstava zabezpečující posuv v ose „x“. Třetí lineární osa je uložena kolmo k předešlým dvěma osám a upevní se přímo, nebo za použití mezikusů na jejich pojezdové vozíčky. Tato lineární osa bude v nanášecím mechanismu zabezpečovat posuv v ose „y“ a je nosným prvkem nanášecí hlavičky. Výhodou tohoto provedení je synchronizované ovládání všech lineárních os přes externí ovladač.

Další výhodou této varianty je fakt, že v provedení s třemi lineárními osami se nanášecí zařízení jako celek nebude výrazně lišit od externího zařízení pro testování nanášecí hlavičky. Z tohoto důvodu by byl proces přechodu z externího testovacího zařízení do fáze implementace nanášecího zařízení do stroje SLM 280HL značně ulehčen.



Obr. 4-6: Konceptní řešení posuvu třemi lineárními osami upevněnými k redukčnímu rámečku tiskárny SLM 280HL

4.4 Volba typu vedení a pohonů

Pro zabezpečení lineárního pohybu nanášecí hlavičky v osách „x“ a „y“ prostoru tiskové komory se použijí lineární osy. Lineární osy se skládají z konstrukčního prvku (těla),

lineárního vedení, pojezdového vozíčku a krokového motoru. Pro volbu lineární osy byly zvažovány tři různé provedení. Lineární osa s řemenem, lineární osa s trapézovým šroubem a lineární osa s kuličkovým šroubem. Tyto provedení se liší jejich rozměrem, přesností opakovatelnosti pozice, silou zatěžování vozíku, maximální rychlostí posuvu a cenou (viz Tab. 4-1). Důležitými faktory při výběru jsou rozměry, a to především z důvodu nutnosti zástavby do již existujícího zařízení a taky možnosti zakrytování pro dosažení co nejlepší prachotěsnosti. Osa bude provozována uvnitř tiskárny SLM 280HL a bude tak vystavena možnému přímému kontaktu s kovovými prášky.

Díky tomu, že rozměry a taky celková hmotnost nanášecí hlavice byly v průběhu návrhu dimenzovány na nízké hodnoty, přenášené síly a momenty budou poměrně malé.

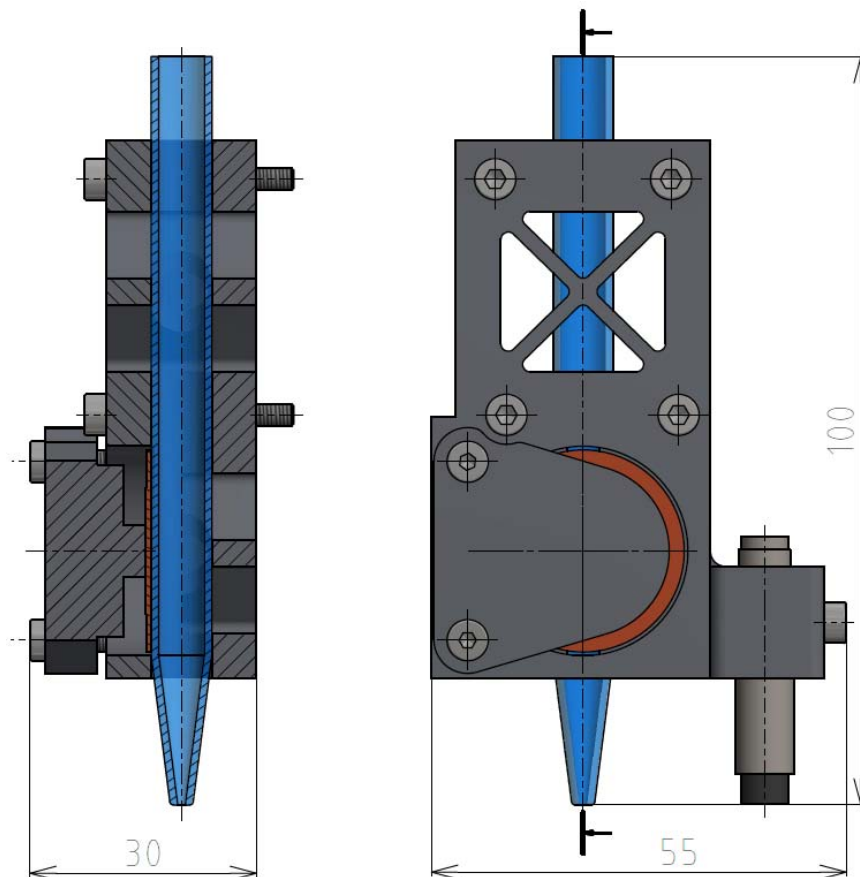
Tab. 4-1: Parametry lineárních os [28,31,32,33,34]

Typ lineární osy	Řemen s vodící tyčí	Trapezový šroub	Kuličkový šroub	Řemen s vodící tyčí	Kuličkový šroub
Označení	MJUNIT- MJ30X	XHGMAK	FUYU-FSL40	FUYU-FBL60	FUYU- FSL80
Prachotěsnost	Částečná	Ne	Ne	Ano	Ano
Funkční posuv [mm]	150	150	150	150	150
Rozměry osy [mm]	350x34x41	312x60x68	349x57x80	460x60x68	535x80x86
Přesnost [mm]	0,1	0,05	0,05	0,1	0,05
Max. rychlost [mm/s]	500	80	80	900	200
Nosnost [kg]	3	15	40	30	60
Cena [Kč/kus]	4210	2790	3050	5880	8260

Po důkladném zvážení všech vstupních parametrů bylo dosaženo následovných závěrů. Prachotěsné varianty lineárních os splňují všechny provozní požadavky pro kvalitní vedení a fungování ve stroji SLM 280HL, avšak z důvodu rozsáhlých krytování rozměrově nevyhovují této aplikaci. Prachotěsné Lineární osy se vyrábějí taky v menších rozměrových řadách, než je uvedeno v (Tab. 4-1), avšak tyto modely jsou poměrně finančně náročné (orientační cena: 27.000 Kč/kus). Z tohoto důvodu budou použity lineární osy s řemenem a vodící tyčí MJUNIT – MJ30X, které pro tuto aplikaci vyhoví jak provozními parametry, tak rozměrově. Dosahují částečné prachotěsnosti a jejich umístění v komoře bude navrženo tak, aby se minimalizovala možnost kontaktu lineárního vedení s práškem. Lineární osu bude nutno po každém pracovním cyklu důkladně očistit a zkontrolovat bezchybnost lineárního vedení. Lineární osa MJUNIT – MJ30X obsahuje motor NEMA 17.

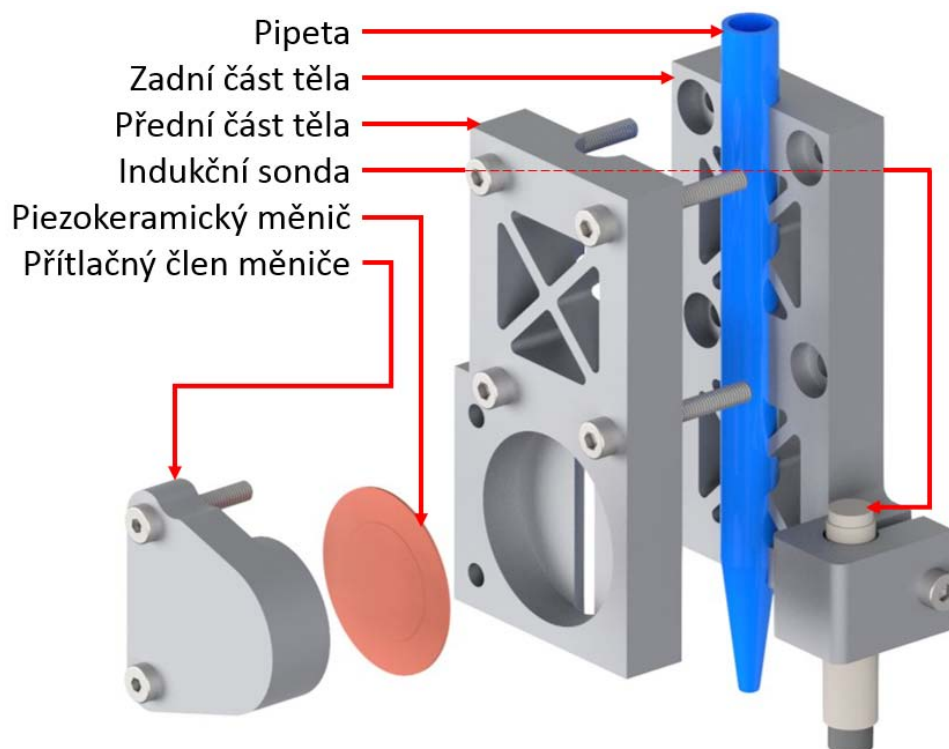
4.5 Nanášecí hlavice pro jeden materiál

Jako první bude navržena nanášecí hlavice obsahující pouze jednu pipetu, a to za účelem ověření funkčnosti provedení daného způsobu nanášení. Hlavice s jednou pipetou (viz Obr. 4-7) bude schopna nanášet pouze jeden práškový materiál.



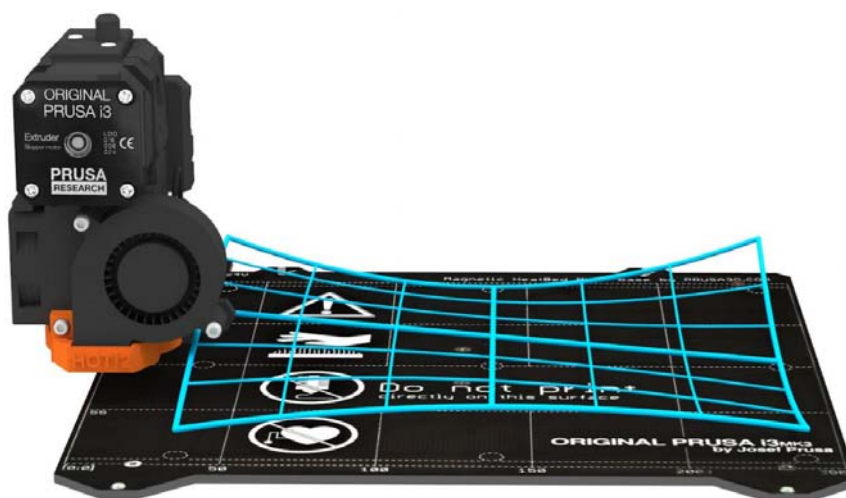
Obr. 4-7: Základní rozměry nanášecí hlavice s jednou pipetou

Navržená hlavice je složena z šesti hlavních dílů (viz Obr. 4-8). Jedním z nich je tělo hlavice, které se skládá ze dvou dílů (přední a zadní část těla). Oba díly budou vyrobeny na 3D tiskárně z materiálu ABS. Povolená pracovní teplota dílů vyrobených z tohoto termoplastu je maximálně 98 °C [30]. Zadní část těla slouží jako upevňovací prvek k plánovanému pohybovému vedení a obsahuje taky držák pro uchycení indukční sondy. Přední část těla je protikusem k zadní části, se kterou společně symetricky obepínají skleněnou pipetu. Tyto dva díly jsou k sobě utažené čtyřmi spojovacími šrouby. Přední část těla dále obsahuje zapuštěný otvor pro uložení piezokeramického měniče. Posledním dílem je přítlačný člen měniče, který je upevněn dvěma spojovacími šrouby k přední části těla a zabezpečuje pevný kontakt mezi piezokeramickým měničem a pipetou.



Obr. 4-8: Popis dílů nanášecí hlavice s jednou pipetou

Důležitou komponentou nanášecí hlavice je indukční sonda, která se standardně používá k automatické kalibraci podložky 3D tiskáren pracujících s technologií fused deposition modeling (FDM). Kalibrace probíhá tak, že indukční sonda zkontroluje 9 rovnoměrně rozložených kalibračních bodů ležících na tiskové ploše (nezáleží na tom, zda jde o práškový nebo hladký povrch) a změří jejich vzdálenost. Tyto body jsou pak potřebným řídicím softwarem interpolovány a použity k vytvoření virtuální mřížky podložky (viz Obr. 4-9). Pokud se během tisku podložka lehce zkroutí, sonda stále přesně kopíruje povrch podle naměřené mřížky. Limit odchylky pro kompenzaci je $\pm 50 \mu\text{m}$ [30].



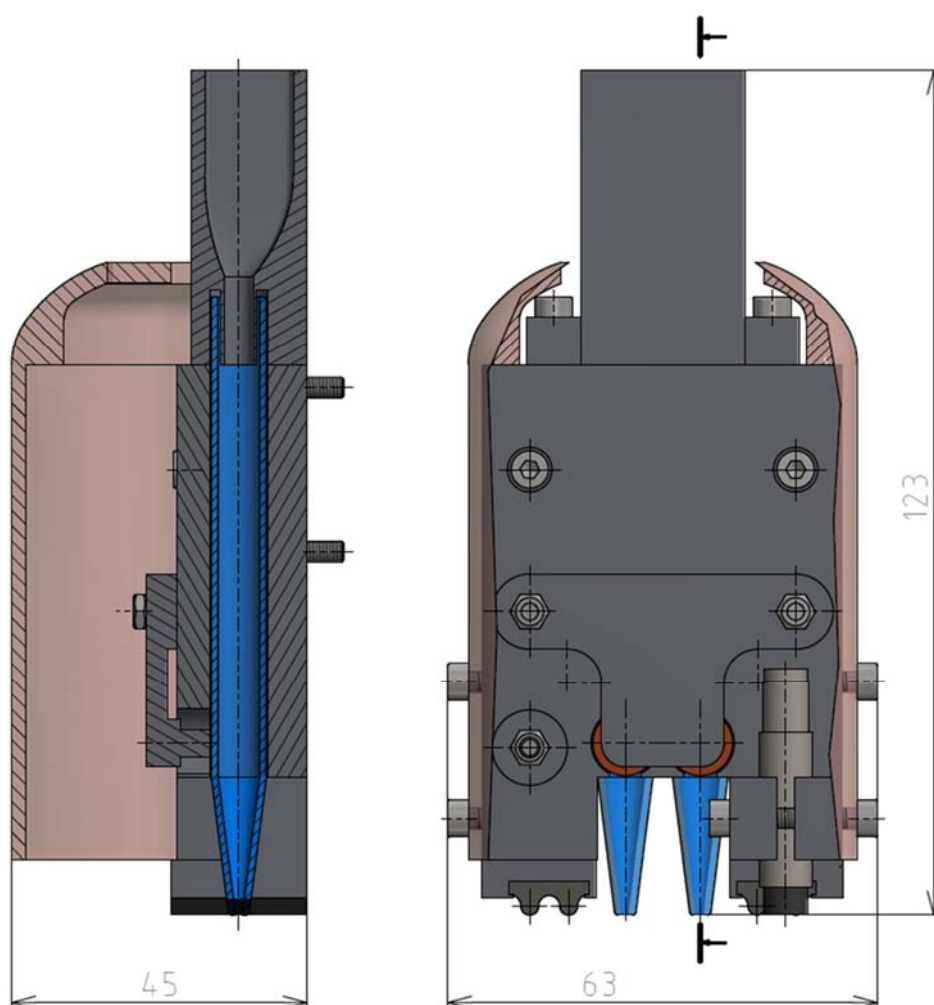
Obr. 4-9: Vizualizace vytvoření virtuální mřížky procesem automatické kalibrace podložky [30]

4.6 Nanášecí hlavice pro dva materiály

Jako druhá bude navržena nanášecí hlavice, s kterou bude možné nanášet již dva práškové materiály. Pro účel zhodnocení možných přístupů řešení byly vytvořené tři koncepty této hlavice. Koncepty obsahují již zmiňovaný princip dávkovacího systému s pipetou a navrhuji možnost optimalizace klíčových komponent tohoto systému z hlediska variability, záměnou za jiné součásti.

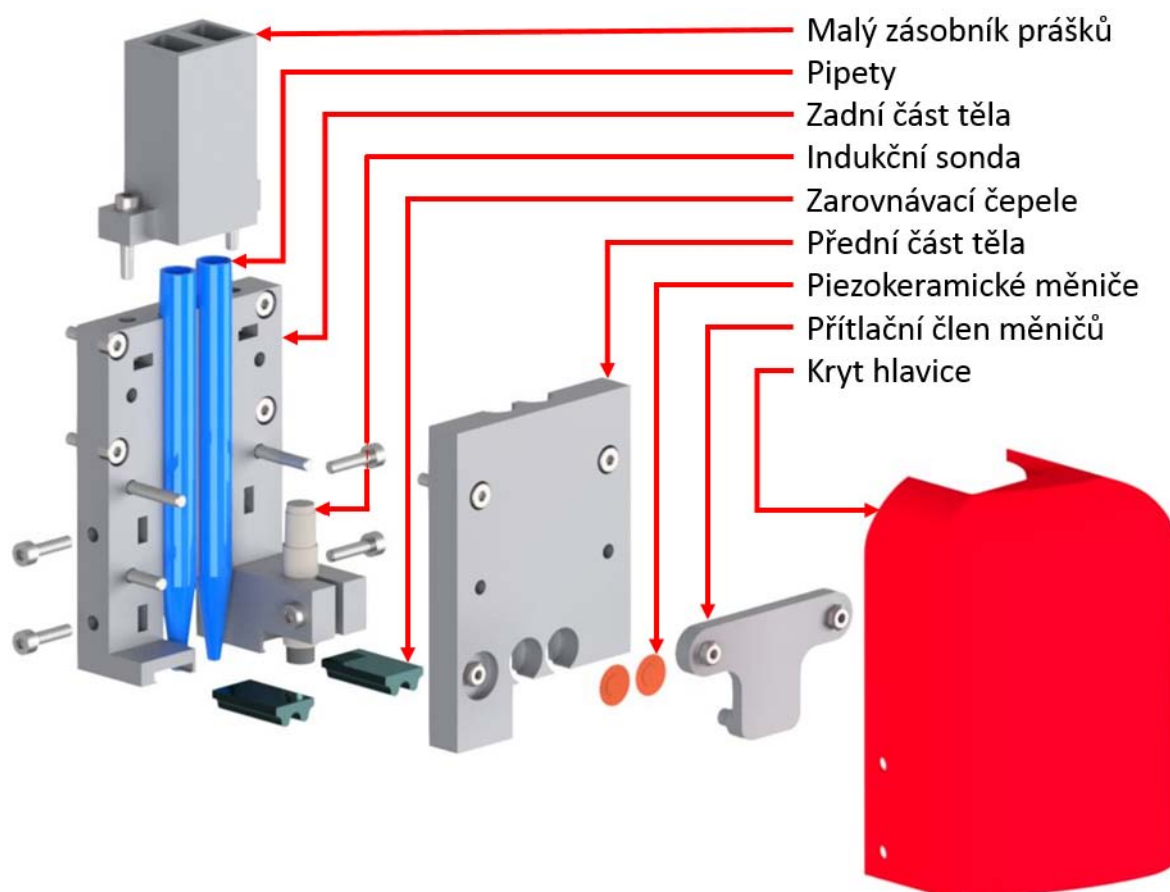
4.6.1 1. Koncept hlavice

V prvním konceptu multimateriálové nanášecí hlavice jsou použity již dvě pipety (viz Obr.4-10). Každá z nich je určena pro nanášení jiného práškového materiálu. Díky navýšení počtu pipet v hlavici bude možné experimentálně testovat nanášení přechodů mezi zvolenými dvojicemi těchto materiálů. V tomto konceptu byl použit stejný princip nanášecího mechanismu jako v přecházející hlavici pro jeden materiál (viz Kapitola. 4.5.), avšak mechanismus byl implementován dvakrát vedle sebe.



Obr. 4-10: Základní rozměry 1. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk

Navržená hlavice obsahuje na rozdíl od její jednodušší verze (viz Kapitola. 4.5.), již devět hlavních dílů (viz Obr. 4-11). Tělo hlavice je opět rozdělené na dva díly (zadní a přední část těla), přičemž zadní část těla byla navíc od uchycení k pohybovému vedení a držáku pro indukční sondu rozšířena o upevňovací drážky pro dvě zarovnávací čepele. Silikonové čepele slouží k zarovnání případných nerovností na nanesené vrstvě a proto jsou umístěny na začátku a konci řady pipet v předpokládaném směru nanášení. Přední část je opět protikusem zadní části, přičemž v tomto provedení obepínají již dvojici skleněných pipet. S rozšířeným počtem pipet se úměrně navýšil i počet piezokeramických měničů a zapuštěných otvorů potřebných pro jejich uložení k pipetě. Dalším dílem je malý zásobník prášků, který je navrženým osazením spojen s pipetami bez možnosti úniku prášku v průběhu kontinuálního dosypání. Hlavice je chráněna krytem, který bude tak jako všechny plastové součásti tohoto provedení vyroben na 3D tiskárně z materiálu ABS.

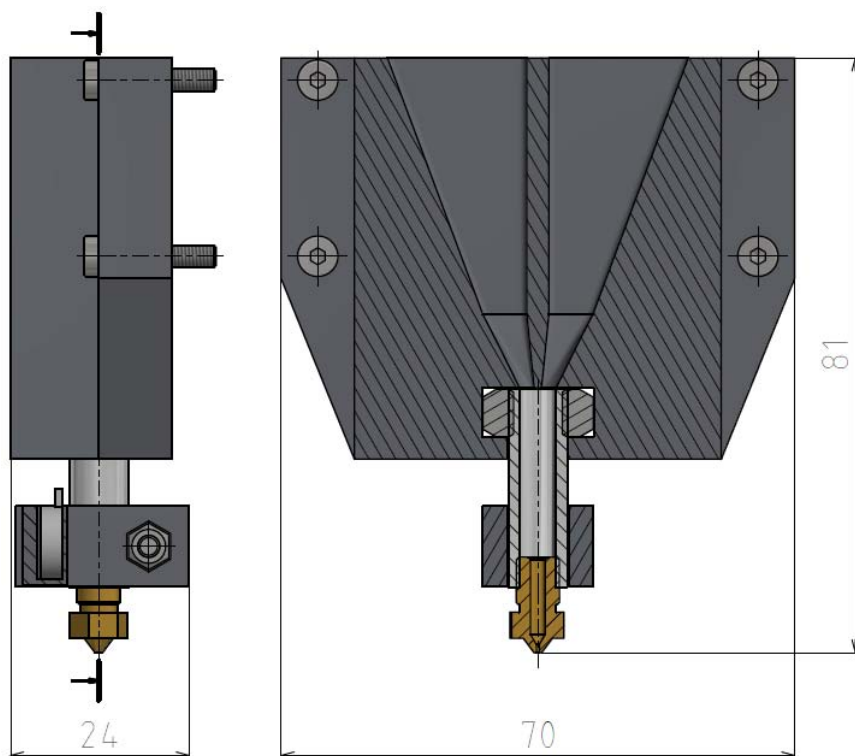


Obr. 4-11: Popis dílů 1. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk

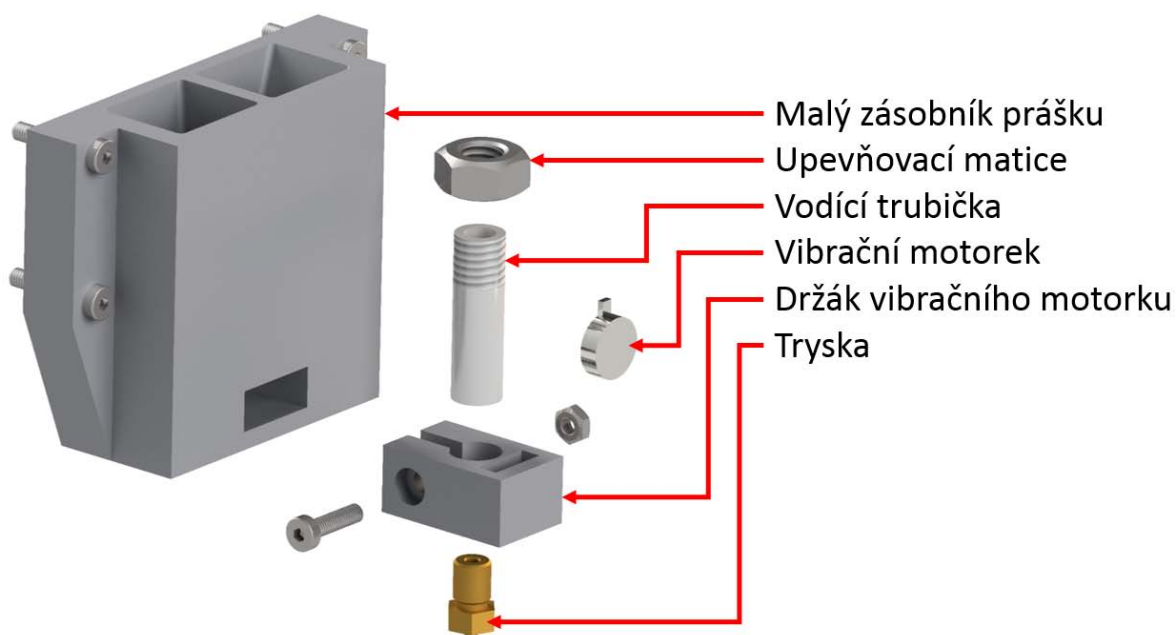
4.6.2 2. Koncept hlavice

Další, v poradí druhý koncept multimateriálové hlavice (viz Obr. 4-12), uvažuje změnu klíčových komponent nanášecího mechanismu s pipetou. Pipeta jako taková byla v předešlém konceptu využita hlavně z důvodu svého specifického zužujícího se tvaru

a přesného výstupního otvoru s malým průměrem. Tyto vlastnosti taktéž splňuje tryska pro 3D tiskárnu pracující s technologií fused deposition modeling (FDM). Z důvodu využití v podobné aplikaci je tato tryska dimenzovaná na jednoduchou instalaci pomocí vnějšího metrického závitu. Piezokeramický měnič je možné nahradit plochým vibračním elektromotorkem s excentrem. Tyto elektromotorky malých rozměrů se standardně používají například v mobilních telefonech.



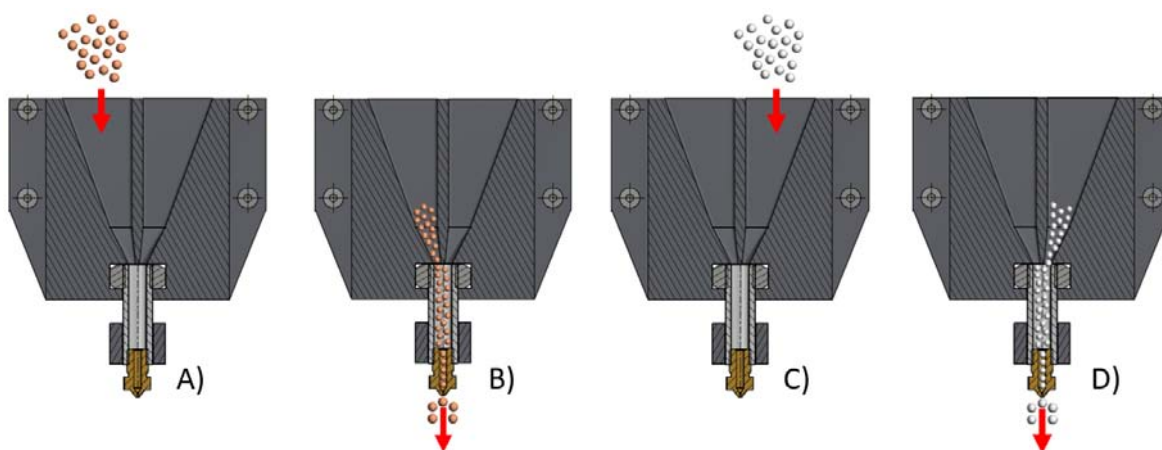
Obr. 4-12: Základní rozměry 2. konceptu nanášecí hlavy pro multimateriálový tisk



Obr. 4-13: Popis dílů 2. konceptu nanášecí hlavy pro multimateriálový tisk

Tělo hlavice bylo navrženo tak, že slouží jako konstrukční prvek k lineárnímu vedení, malý zásobník prášku pro dva materiály a zároveň obsahuje montážní prvky pro vodící trubičku s tryskou (viz Obr. 4-13). Vodící trubička má ve svojí spodní části našroubovanou trysku a k malému zásobníku se připojí za pomoci upevňovací matice způsobem, že vrchní část trubičky plynule naváže na výstupní otvory obou prostorů uskladňujících práškový materiál. Na spodní část vodící trubičky se za pomoci šroubového svěrného spoje nainstaluje držák vibračního motorku, který obsahuje otvor pro jeho uložení. Malý zásobník prášku a držák vibračního motorku jsou vyrobené na 3D tiskárně z materiálu ABS. Pro výrobu vodící trubičky bude použitý hliníkový polotovár.

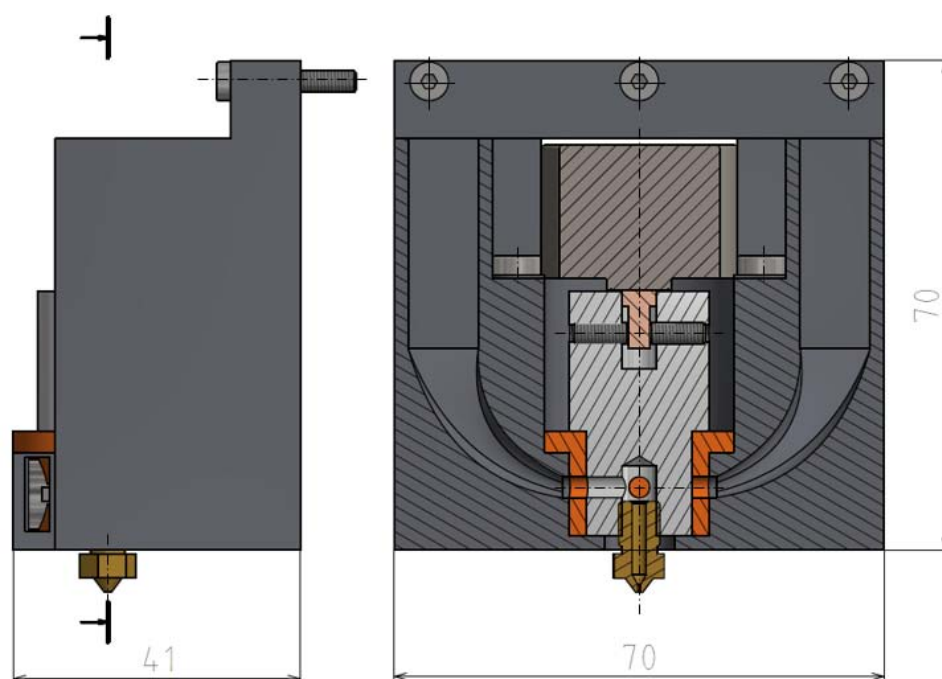
Tento koncept používá pouze jednu nanášecí trysku, z důvodu eliminace možnosti kolize s již nanesenou vrstvou. Jelikož se tryska bude pohybovat v těsné blízkosti nad podložkou tiskárny (cca 50 μm), použití dvou trysek by vyžadovalo velice komplikované seřízení obou trysek do stejné výšky. Seřizování hlavice pro danou tloušťku vrstvy se tedy stává jednodušším, avšak za cenu možného vzniku kontaminace prášku ve vodící trubičce a trysce společné pro oba prášky. Pro minimalizování možnosti kontaminace prášků v zásobníku, je s tímto konceptem nutno použít způsob postupného plnění a nanášení (viz Obr. 4-14). Tento způsob funguje tak, že do malého zásobníku se nejprve nasype dané množství prvního práškového materiálu, potřebného pro konkrétní vrstvu (viz Obr. 4-14 A). Až je vrstva nanesená (viz Obr. 4-14 B), hlavice vyprázdní zbylý prášek z hlavice do odpadového kanálu. Následně je do hlavice nasypán druhý práškový materiál, potřebný pro konkrétní vrstvu (viz Obr. 4-14 C) a po její nanesení (viz Obr. 4-14 D) se hlavice opětovně vyprázdní. Proces se cyklicky opakuje v každé vrstvě. Pro snížení počtu potřebných výměn materiálů v hlavici, a tedy i ulehčení ovládání je možné začínat novou vrstvu vždy materiálem kterým předchozí vrstva končila, čím se proces výrazně urychlí.



Obr. 4-14: Ukázka způsobu postupného plnění a nanášení prášku 2. konceptem nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk: A) Nasypání daného množství prvního materiálu, B) Nanesení vrstvy a následné vyprázdnění zbytku prvního materiálu, C) Nasypání daného množství druhého materiálu, D) Nanesení vrstvy a následné vyprázdnění zbytku druhého materiálu

4.6.3 3. Koncept hlavice

Třetí koncept multimateriálové hlavice (viz Obr. 4-15) vychází z druhého konceptu (viz Kapitola 4.6.2) a poukazuje na možnost úpravy některých aspektů tohoto konceptu. Aby bylo možné mít v malém zásobníku hlavice simultánně oba prášky a pouze přepínat který z nich se má aktuálně nanášet, je nutno mít uzavíratelné výstupní otvory obou prostorů malého zásobníku. Řešením tohoto problému je navržená regulační hřídelka. Regulační hřídelka obsahuje v rovině výstupních otvorů malého zásobníku, dva otvory vzájemně pootočené o 90° v téže rovině. Jelikož výstupní otvory malého zásobníku jsou umístěné v jedné ose, čili vzájemně pootočené o 180° v již zmiňované rovině, mezi otvory regulační hřídelky a otvory malého zásobníku můžou nastat právě tři regulační pozice (viz Obr. 4-16). Regulační hřídelkou, poháněnou krokovým motorem a osazenou ve vlepeném ložisku, je tedy možné dosáhnout pozice otevření pouze prvního výstupního otvoru, nebo otevření pouze druhého výstupního otvoru anebo uzavření obou otvorů.

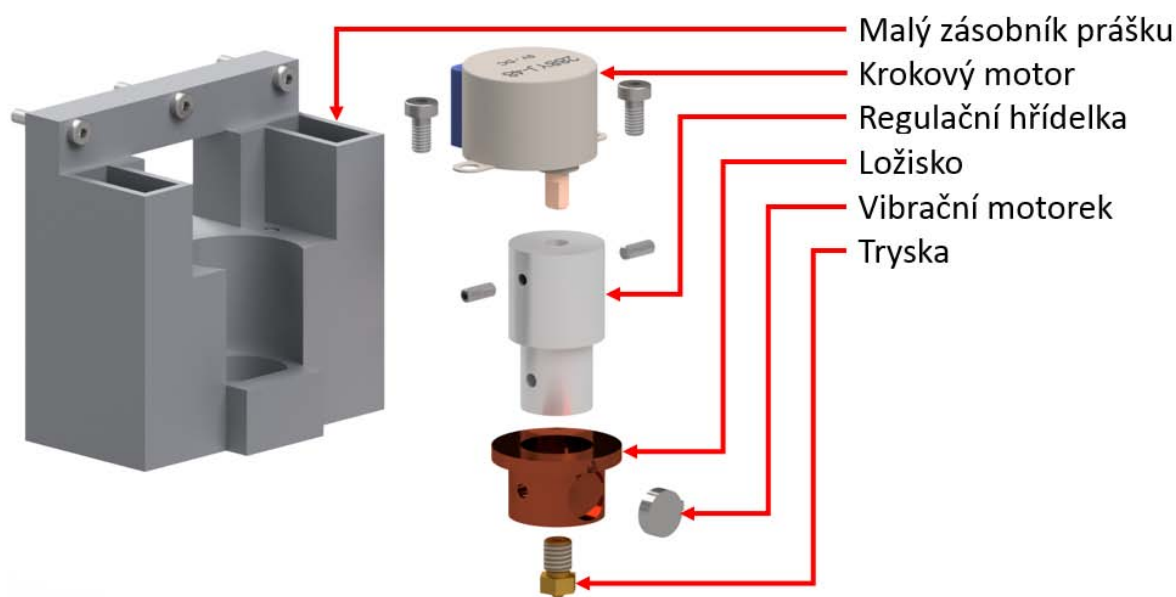


Obr. 4-15: Základní rozměry 3. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk



Obr. 4-16: Možné přepínání pozic otvorů regulační hřídelky vůči otvorům malého zásobníku prášku

Tělo hlavice posledního koncepčního řešení multimateriálové hlavice je stejně jako u jejích předchůdců vyrobeno pomocí 3D tisku, z materiálu ABS. Malý zásobník prášku slouží jako konstrukční prvek k lineárnímu vedení, malý zásobník prášku pro dva materiály a zároveň obsahuje montážní prvky pro krokový motor, ložisko či prostor pro uložení regulační hřídelky a plochého vibračního motorku s excentrem (viz Obr. 4-17). Regulační hřídelka může být vyrobena z hliníkového polotovaru. Zajímavostí tohoto konceptu je fakt, že nanášecí tryska je přímo zašroubovaná do spodní části hřídelky, tudíž regulační hřídelka jako jeden navržený komponent slouží k regulaci i distribuci prášku až do trysky.



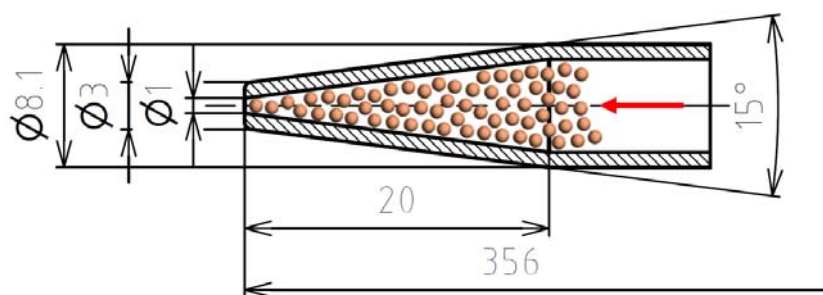
Obr. 4-17: Popis dílů 3. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk

4.7 Nanášecí prvek

4.7.1 Pipeta

V úvahu přichází široké množství skleněných pipet, které je možné využít pro tuto aplikaci. Pipety byly vybírány zejména podle průměru výtokového otvoru a uhlu zužování pipety.

Zvolený rozměr výtokového otvoru pipety určí minimální úroveň detailu nanášení. Jelikož velikosti pracovních prostorů tisku, na které chceme nanášet (viz Obr. 4-3), jsou poměrně rozměrné, byla zvolena velikost výtokového otvoru pipety 1 mm (viz Obr. 4-18). S tímto průměrem jsme tedy schopni rozdělit 1 cm² nanášené vrstvy na síť virtuálních voxelů o maximálních rozměrech 10 x 10. Zvolená pipeta je pro tuto aplikaci zbytečně dlouhá, a proto je nutno ji zkrátit.

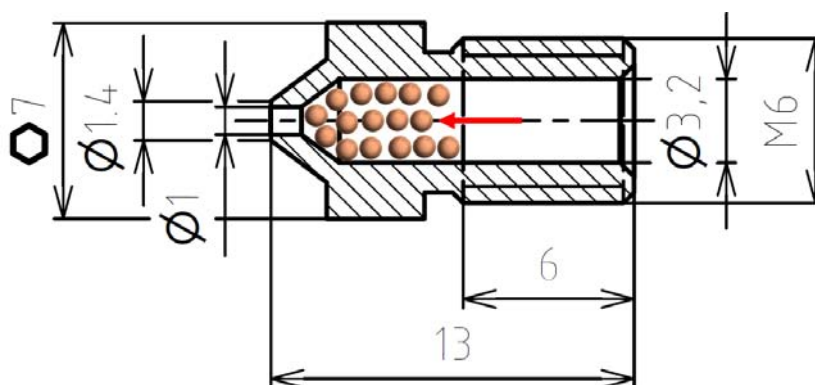


Obr. 4-18: Rozměry zvolené pipety a naznačení směru pohybu práškového materiálu

4.7.2 Tryska

Trysky pro 3D tiskárnu pracující s technologií fused deposition modeling (FDM) jsou standardní lehce dostupní komponentou (viz Obr. 4-19). Pro aplikaci v nanášecí hlavici jsou výhodné z důvodu malých rozměrů, jednoduché instalace, vyměnitelnosti a odolností vůči poškození v případě kolize. Jsou vyrobené z mosazi a průměry výstupního otvoru trysky jsou standardně dostupné v desetinových posuvech od 0,1 mm do 1 mm. Vnitřní průměr těla trysky se vyrábí pro dva standardní rozměry filamentových strun a to průměry 1,75 mm a 3 mm.

Vhodnost jednotlivých rozměrů trysek pro aplikaci nanášení práškového materiálu bude ověřena na externím zařízení pro testování nanášecí hlavičky.



Obr. 4-19: Rozměry trysky s průměrem výstupního otvoru 1 mm, určené pro filamentovou strunu o průměru 3 mm a naznačení směru pohybu práškového materiálu

4.8 Vibrační prvek

4.8.1 Piezokeramický měnič

Jako zdroj vibrací, je v originálním patentovaném dávkovacím systému s pipetou (viz Kapitola 2.3.9), použitý piezokeramický měnič. Tyto měniče jsou dostupné v různých

tvarech a velikostech. Jejich funkce spočívá ve využití principu přímého a nepřímého piezoelektrického jevu. Z důvodu, že měnič musí být v kontaktu s pláštěm pipety, byly zvažovány piezokeramické kroužky, trubičky anebo nejvíc dostupné disky.

Pro zachování variability testovací hlavičky, a taky možnosti testování případných jiných rozměrů pipet či trysek, při zachování stejného piezokeramického měniče jako zdroje vibrací, byly zvoleny piezokeramické disky.

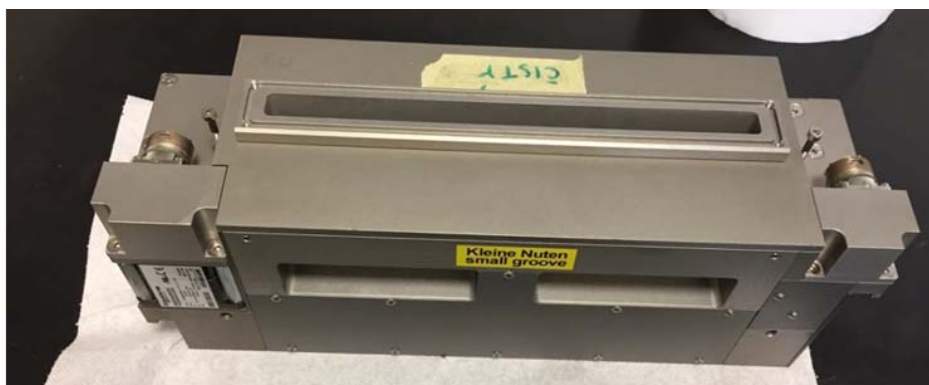
4.8.2 Vibrační motorek s excentrem

Dalším potencionálním vibračním prvkem pro tuto aplikaci je vibrační motorek s excentrem. Tyto elektromotorky malých rozměrů mají široké uplatnění v elektrotechnickém průmyslu a jsou součástí téměř všech mobilních telefonů na trhu. Standardně jsou dostupné ve dvou provedeních, a to jako válcový vibrační motorek, nebo plochý vibrační motorek.

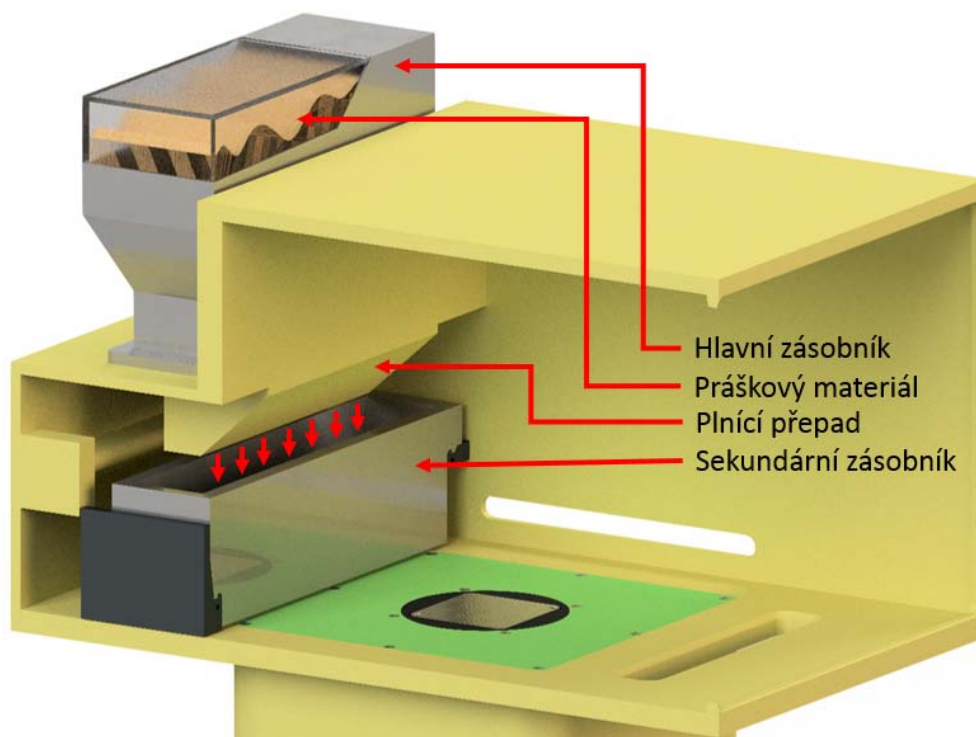
Pro aplikaci v nanášecí hlavici se víc hodí plochý vibrační motorek z důvodu jeho celkového zakrytování rotující hřídelky.

4.9 Zásobníky prášku

Nanášecí zařízení pracuje s velkým množstvím práškového materiálu, který jak kvůli jeho objemu, tak kvůli svojí hmotnosti nemůže být všechen uskladněn v nanášecí hlavici. Proto tiskárna SLM 280HL už i ve svém původním provedení obsahuje zásobníky dva. Hlavní zásobník, pevně uložený v zadní části konstrukce stroje, a sekundární zásobník (viz Obr. 4-20), umístěn přímo v nanášeči. Když je nanášecí úplně zasunut v zadní části komory, je možné doplňovat prášek z hlavního zásobníku do sekundárního, a to za pomoci dávkovacího systému obsaženého ve spodní části hlavního zásobníku. Dávkovaný materiál dále padá přes plnicí přepad do sekundárního zásobníku (viz Obr. 4-21) a zabezpečuje tak kontinuální přísun práškového materiálu do nanášeče.



Obr. 4-20: Nanášec tiskárny SLM 280HL obsahující sekundární zásobník



Obr. 4-21: Popis originálního systému pro doplňování práškového materiálu v tiskárně SLM 280HL

Jelikož v našem provedení bude použit víc než jeden materiál, je nutno tyto zásobníky upravit. Hlavní zásobník bude rozdělen na dvě komory s nezávislým dávkovacím systémem a sekundární zásobník v hlavici bude navržen tak, aby měl dvě oddělené nádoby pro prášek, ze kterých bude materiál přiváděn do patřičných nanášecích prvků (viz Kapitola 4.6). Vedení hlavičky je nutno dimenzovat tak, aby sekundární zásobník, který je umístěn v nanášecí hlavici, měl možnost zajíždět až pod otvor plnicího přepadu hlavního zásobníku, kde bude probíhat jeho doplňování.

Při práci s práškovým materiálem vznikají různé problémy, jako například zachytávání prášku na okrajích zásobníku, kvůli čemuž není do jeho výstupu přiváděno potřebné množství prášku. Zabrání se tomu přidáním vibračních motorků umístěných ve významných bodech zásobníků (primárně u jejich výstupů). Vibrace zapříčiní zbrzdění zachyceného prášku a zaplnění výstupního otvoru práškovým materiálem.

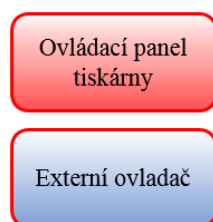
4.10 Řízení procesu tisku

Řízení procesu tisku může být rozděleno do šesti kroků, které se v průběhu tohoto procesu automaticky, nebo manuálně vykonávají (viz Obr. 4-22). V standardním procesu tisku probíhající na stroji SLM 280HL, se nahrají připravená data obsahující vypalovací trajektorie a informace o tloušťkách jednotlivých vrstev do ovládacího panelu tiskárny a všechny procesy jsou automaticky řízeny vestavěným počítačem.

STANDARDNÍ PROCES TISKU:



ŘÍZENÍ PROCESU:

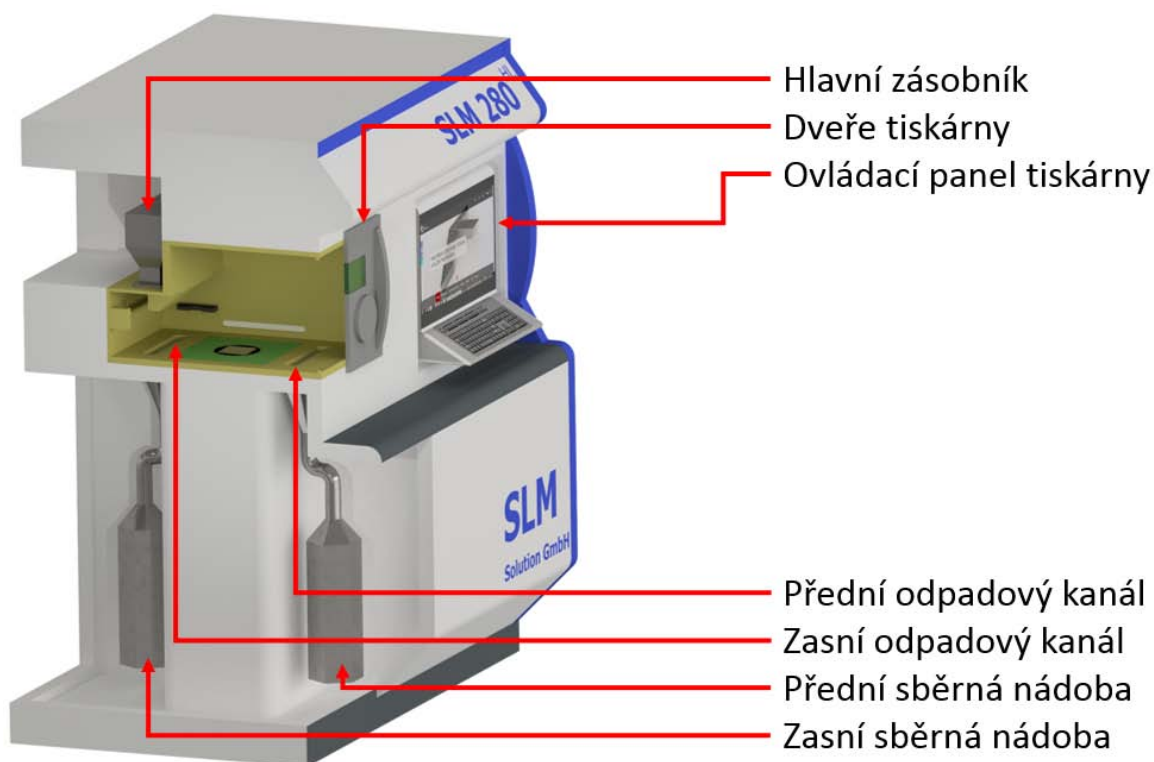


UPRAVENÝ PROCES TISKU:



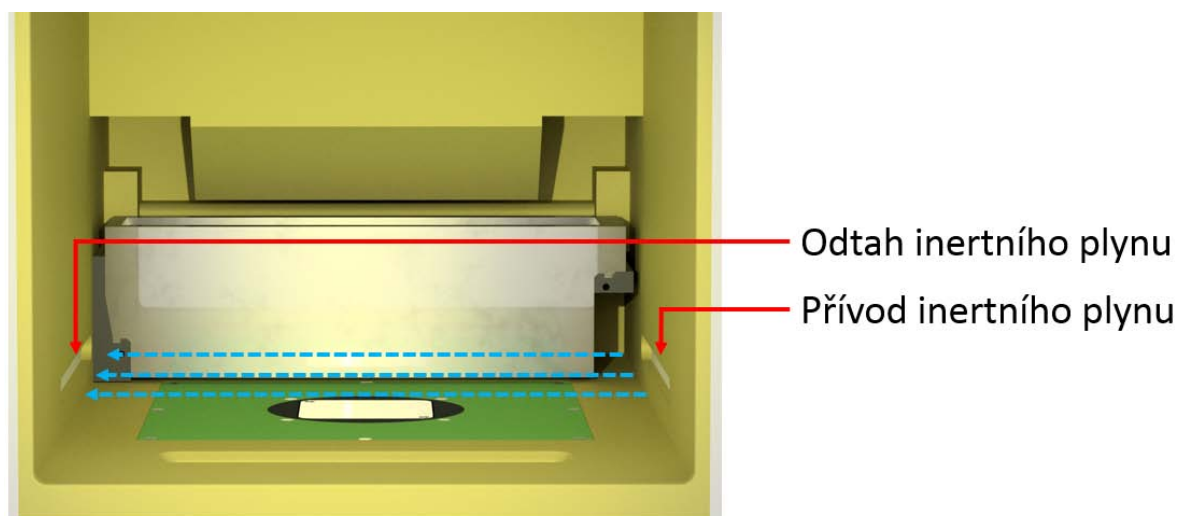
Obr. 4-22: Schématické zobrazení změny řízení procesu tisku s upraveným nanášecím zařízením

Pro spuštění procesu tisku se tiskárna uvede do chodu, založí se naplněný hlavní zásobník prášku, sběrní nádoby pod přední a zadní odpadový kanál, manuálně se zarovná tisková platforma do nulové pozice a uzavřou se dveře tiskárny (viz Obr. 4-23). Vykonáním těchto kroků se tiskárna stává aktivní a vzduchotěsně uzavřenou.



Obr. 4-23: Příprava standardního procesu tisku a popis klíčových komponent

Prvním krokem, je vytvoření inertní atmosféry v komoře tiskárny, kterou je pro inicializaci tisku potřebné spustit. Zaplavení komory inertní atmosférou se inicializuje přes ovládací panel tiskárny a v průběhu tisku inertní plyn proudí nad tiskovou platformou (viz Obr 4-24).

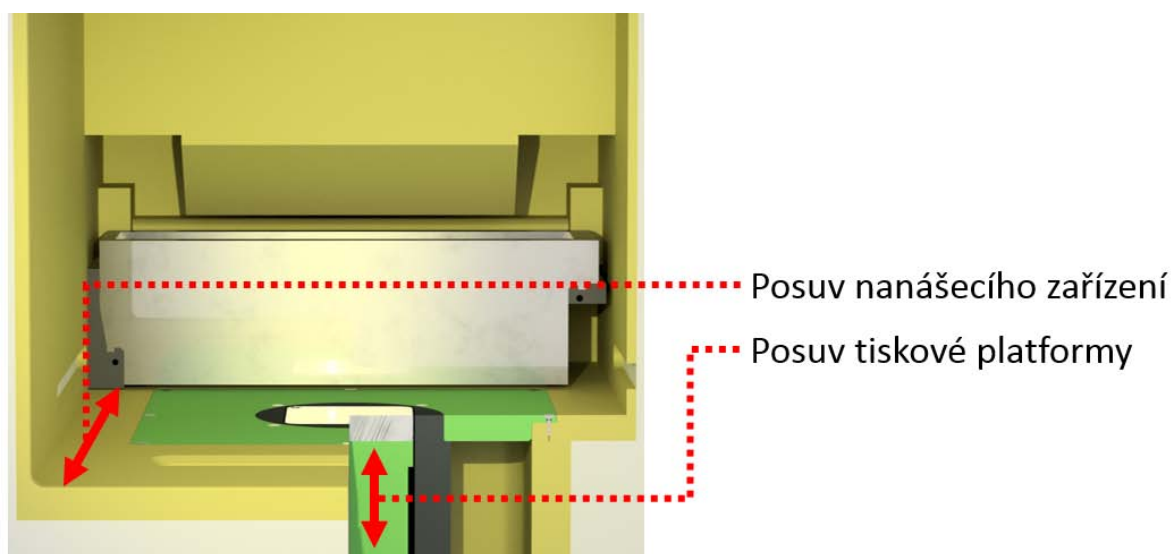


Obr. 4-24: Schéma proudění inertního plynu v komoře tiskárny

Druhým krokem je posuv tiskové platformy. Posuv je po nastavení nulové pozice platformy řízen automaticky ovládacím panelem tiskárny na základě připravených dat vyráběného dílu. Software vždy po vypálení jedné vrstvy posune platformu dolů, o výšku jedné vrstvy, aby tak uvolnil prostor pro nanesení dalšího prášku (viz Obr. 4-25). Po posunutí platformy přichází na řadu další, v pořadí již třetí ovládací krok a tím je pohyb nanášecího zařízení. Pohyb v originálním provedení tiskárny vykonávají dvě lineární vedení (viz Obr. 4-25), skryté v bočních zdech komory a zabezpečují pohyb celého nanášече. Pohyb nanášecího zařízení je vykonáván simultánně s dalším krokem, dávkováním materiálu, jelikož právě nanášеч zastává tuto funkci (viz Obr. 2-7). Když je vrstva nanesená a nanášеч se dostane do koncové pozice v přední nebo zadní části stroje, software tiskárny automaticky spouští pátý krok, laserové zpracování nanesené vrstvy. Laser je umístěn přímo nad tiskovou platformou v stropu komory (viz Obr. 2-6), a vypaluje pozice jednotlivých vrstev na základě připravených dat. V případě že nanášеч nemá ve svém sekundárním zásobníku dostatečné množství prášku, proběhne jeho doplnění z hlavního zásobníku (viz Kapitola 4.9). Proces se opakuje až do vytvoření poslední vrstvy vyráběného dílu podle připravených dat (viz Obr. 4-22). Když je proces tisku úspěšně ukončen, inertní atmosféra, motory posuvů a laser jsou ovládacím panelem tiskárny vypnuty a vyrobený díl je možné z tiskárny vyjmout.

Jelikož se vytváří nové nanášecí zařízení, které bude obsahovat jiné komponenty a mechanismy, úplná kompatibilita ovládání není v primární fázi řešení možná. Výrobce zařízení SLM 280HL neumožňuje editaci ovládání tiskárny. Z tohoto důvodu se v koncepčním řešení počítá s použitím dalšího externího ovladače, do kterého bude vyvedené ovládání některých kroků procesu tisku (viz Obr. 4-22). Ovládání inertní

atmosféry, posuvu tiskové platformy (osa „z“) a laseru, budou i nadále řízeny přes vstavěný ovládací panel tiskárny. Zbylé tři kroky, pohyb nanášecího zařízení (osy „x“ a „y“), ovládání dávkování materiálu a regulace doplňování prášku, budou z důvodu změny nanášecího zařízení ovládané externím ovladačem.



Obr. 4-25: Schéma pohybových mechanismů v komoře tiskárny

4.10.1 Externí ovládání nanášecího zařízení

Z mnoha druhů řídicí elektroniky, které mohou být využity v externím ovladači, byla vybrána programovatelná počítačová deska Arduino. Zvolena byla z důvodu, že tato počítačová deska se již používá v širokém spektru 3D tiskáren k řízení celého procesu. Arduino poskytuje snadno dostupný hardware i software, potřebný k řízení těchto procesů. K Arduino se budou připojovat další ovládací desky, například shield RAMPS 1.4, který umožňuje zapojení krokových motorů, vibračních prvků, či koncových snímačů.

Jelikož výrobce tiskárny neumožňuje propojení externího ovládání nového nanášecího zařízení s ovládacím panelem tiskárny, bude proces tisku probíhat v manuálním režimu. V tomto režimu se externím ovladačem spustí nanesení jedné vrstvy a následně se ovládacím panelem tiskárny daná vrstva laserově zpracuje.

4.11 Zhodnocení a postup řešení

V rámci vývoje nového nanášecího zařízení, které je předmětem této práce, bude sestavené externí zařízení pro testování nanášecích hlav. Pro konstrukci tohoto externího zařízení se využije 3D tiskárny Prusa i3 MK3.

Za účelem ověření funkčnosti principu nanášení prášku pipetou, bude jako první sestrojena a testována nanášecí hlavice pro jeden materiál (viz Kapitola 4.5). Následně budou sestrojeny a testovány první dva koncepty nanášecí hlavice pro dva materiály (viz Kapitola 4.6.1 a 4.6.2). Tyto koncepty byly zvoleny z důvodu experimentálního ověření možnosti záměny nanášecích a vibračních prvků patentovaného dávkovacího systému s pipetou (viz Kapitola 2.3.9). Porovnávat se budou nanášecí prvky pipeta a tryska s výstupním otvorem 1 mm a vibrační prvky v podobě piezokeramického disku a plochého vibračního elektromotorku s excentrem.

Pro řízení nanášecího zařízení bude sestrojen a naprogramován externí ovladač, ve kterém bude použita programovatelná počítačová deska Arduino a její další komponenty.

Po vykonání experimentů na externím testovacím zařízení, bude sestrojeno již výsledné nanášecí zařízení implementovatelné do tiskárny SLM 280HL. Zařízení bude pro lineární pohyb nanášecí hlavice využívat tři lineární osy MJUNIT – MJ30X s krokovým motorem NEMA 17, uchycené k redukčnímu rámečku (viz Obr. 4-6).

Dále bude sestrojen nový hlavní zásobník prášku, obsahující již dvě samostatné komory pro jednotlivé práškové materiály. Každá dávkovací komora bude disponovat vlastním dávkovacím systémem, aby byla zaručena možnost selektivního doplňování jednotlivých prášků do malého zásobníku, umístěného v nanášecí hlavici.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Proces vytvoření nanášecího zařízení, je z důvodu přehlednosti nutno rozdělit do čtyřech částí. V první, vývojové části, bylo sestrojeno externí nanášecí zařízení a nanášecí hlavice. Hlavice byly na tomto zařízení testované a optimalizované. Pro ovládání externího nanášecího zařízení a nanášecích hlavic, byla vytvořena a naprogramována první verze externího ovládače. Pomocí externího nanášecího zařízení, byly definované nanášecí parametry jednotlivých práškových materiálů a řešená byla taky problematika přechodu mezi práškovými nánosy, jak na stranách, tak v rozích nanášených tvarů. Na základě vykonaných experimentů, byl zvolen jeden koncept multimateriálové hlavice pro tvořené nanášecí zařízení.

V druhé, konstrukční části, proběhla konstrukce nového hlavního zásobníku a nanášecího zařízení implementovatelného do tiskárny SLM 280HL. Sestrojen byl také externí ovladač, obsahující veškerou elektroniku potřebnou k ovládání jednotlivých nanášecích uzlů. Ovladač byl naprogramován tak, aby se téměř všechny potřebné procesy v průběhu tisku vykonávaly automaticky a eliminovala se tak možnost chyby způsobené operátorem.

Třetí, testovací částí, byla implementace nanášecího zařízení do tiskárny a kontrola těsnosti stroje. Vykonány byly taky první testy selektivního nanášení multimateriálové vrstvy v tiskárně.

Ve čtvrté, finální části, proběhl tisk 3D multimateriálového dílu, se změnou materiálu ve všech třech osách. Demonstrována byla funkčnost vytvořeného nanášecího systému a jeho kompatibilita s tiskárnou SLM 280HL.

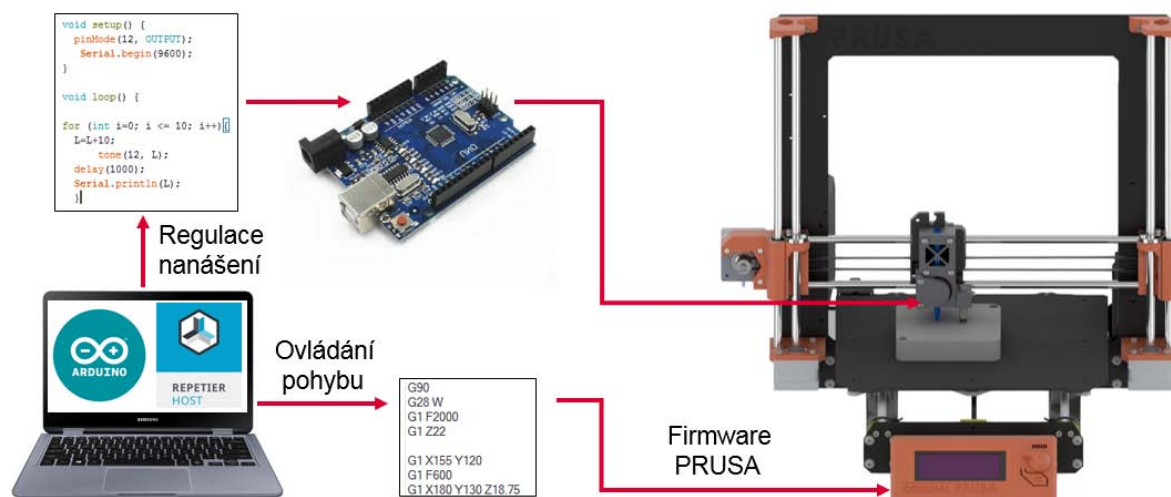
5.1 Vývojová část

5.1.1 Externí nanášecí zařízení

Toto zařízení bylo sestavěno za účelem testování nanášecích hlavic, tvorby ovládacího systému a definování nanášecích parametrů jednotlivých prášků. Pro zabezpečení pohybu nanášecí hlavice ve všech třech osách, byla použita 3D tiskárna Prusa i3 MK3, která již obsahuje firmware pro regulaci pohybu ve všech třech osách souřadného systému. Na této 3D tiskárně vykonává tisková hlavice pohyb v osách „x“ a „z“ a tisková platforma zabezpečuje pohyb v ose „y“. Hlavice 3D tiskárny, v původním provedení sloužící k podávání filamentu, jeho tavení a distribuování, byla demontována a odpojena od řídicí elektroniky, aby se na její místě mohly testovat navržené hlavice.

3D tiskárna Prusa i3 MK3 již obsahuje veškerou řídicí elektroniku, která za použití potřebných softwarů, umožňuje uživateli přístup do tohoto rozhraní. Pro ovládání pohybů

externího nanášecího zařízení se použil software Repetier-Host, který dovoluje jak manuální ovládání pohybových motorů jednorázovým příkazem, tak automatické ovládání pomocí předem napsaného řídicího skriptu ve formě G-kódu (viz Obr. 5-1). Skript pro ovládání vibračních prvků testované hlavice byl naprogramován ve vývojovém prostředí Arduino. Nanášení může být regulováno ON-line zapojením do počítače, nebo OFF-line předem nahraným programem do počítačové desky Arduino UNO.



Obr. 5-1: Schématické zobrazení ovládání testovacího zařízení

Pro nanášecí hlavice byly z důvodu srovnání použity jako nanášecí prvky pipety a trysky s průměrem výstupního otvoru 1 mm (viz Obr. 4-18 a 4-19). Vibrační prvky byly zvoleny v podobě piezokeramického měniče diskového tvaru s průměrem 27 mm a předepsanou rezonanční frekvencí 5 kHz a plochého vibračního motorku s excentrem o průměru 10 mm a předepsaným pracovním napětím 5 V.

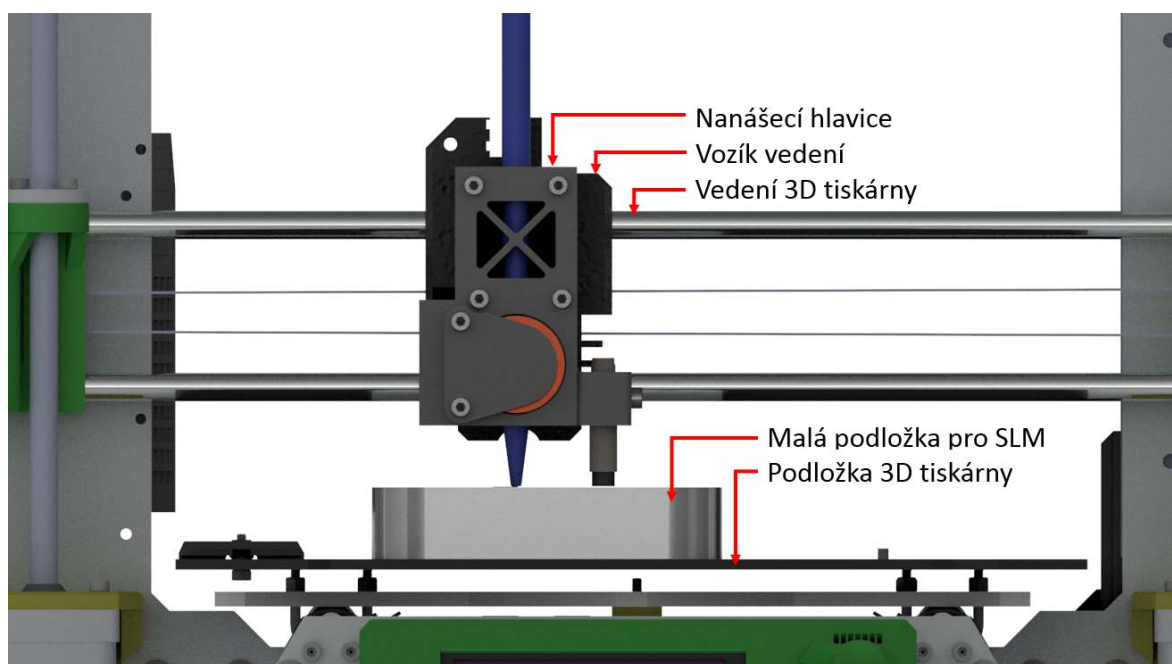
5.1.2 Testování nanášecích hlavic a určení nanášecích parametrů

Aditivní technologie vyžadují pro kvalitní tisk důkladné sladění různých parametrů (tloušťka nanášené vrstvy, rychlost nanášení atd.). Jelikož každý z nich má výrazný vliv na kvalitu výsledného produktu, je zapotřebí prozkoumat možné rozhraní jednotlivých parametrů. Po nalezení funkčních intervalů jednotlivých parametrů, můžou být stanoveny jejich vhodné kombinace, a to za účelem dosažení dané kvality tisku.

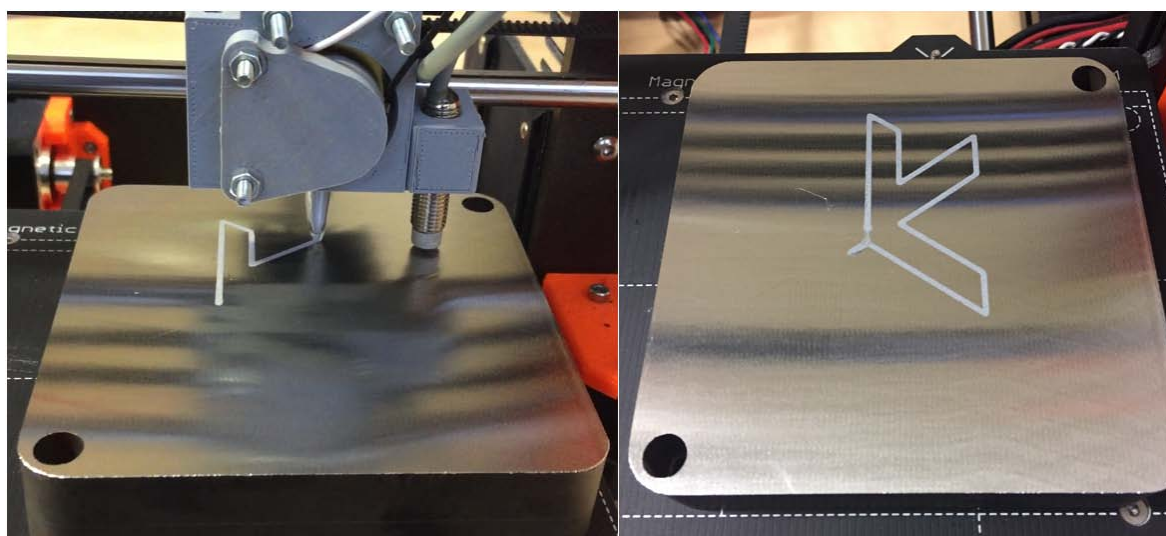
Veškeré experimenty byly vykonané na vybroušené ocelové malé platformě pro SLM, tak aby nanášení probíhalo na stejném povrchu, jak tomu bude v tiskárně SLM 280HL. Pro experimenty, byly za účelem prozkoumání možností nanášení různých prášků, použity materiály 316L, Cu7.2Ni, FeAm a ENAW2618.

Jako první se testovala hlavice pro jeden materiál, používající kombinaci pipety a piezokeramického měniče s rezonanční frekvencí 5 kHz (viz Obr. 5-2). Hlavice byla díky

své jednoduchosti použita k úspěšnému ověření systému nanášení a k vytvoření ovládacích skriptů (viz Obr. 5-3).



Obr. 5-2: Schéma externího nanášecího zařízení s namontovanou hlavicí pro jeden materiál



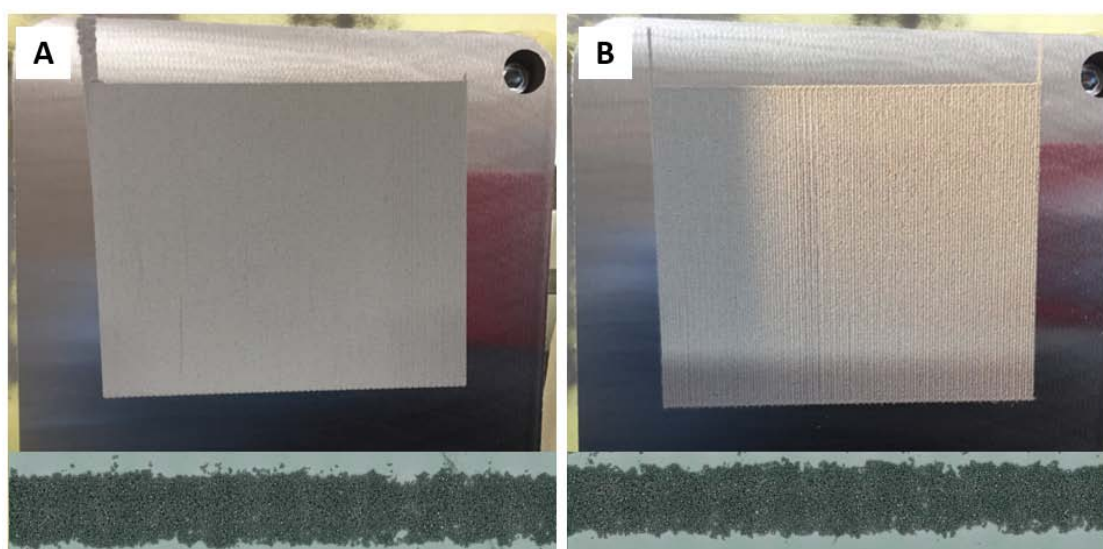
Obr. 5-3: Testování systému nanášení a ovládacího skriptu na nanášecí hlavici pro jeden materiál

Za účelem hlubšího prozkoumání možností dávkovacího systému s pipetou byly testované dva přístupy kontrolovaného nanášení vrstvy. Testován byl způsob bodového nanášení jednotlivých voxelů o detailu (1 x 1) mm a způsob kontinuálního nanášení celistvých tvarů. Nanášení samostatných voxelů nedosahovalo z důvodu kruhového otvoru trysky tak celistvého propojení vrstvy, jak tomu bylo u kontinuálního nanášení, které dosahovalo navíc pouze polovičního nanášecího času. Na základě těchto poznatků byly další experimenty vykonávány pouze kontinuálním nanášením, které však pro kontrolované nanesení vrstvy

vyžaduje rozsáhlou manuální přípravu pohybových příkazů. Pohybové příkazy pro nanesení jednotlivých materiálů musí být navrženy tak, aby nanesly všechny požadované virtuální voxely platformy jedním kontinuálním tahem, a zároveň zamezili přechodu přes oblast s již naneseným druhým materiálem. Jelikož tento nanášecí přístup není standardem, dostupné softwary neumožňují automatické vygenerování takto specifických nanášecích trajektorií. Z tohoto důvodu byly veškeré pohybové skripty programované manuálně.

Jako druhý byl testován první koncept nanášecí hlavice pro dva materiály, který již obsahoval dvě sady pipet s piezokeramickým měničem. Hlavním cílem testování tohoto konceptu bylo prozkoumání možností použití více nanášecích prvků v jedné hlavici. Jelikož zvětšením počtu nanášecích prvků se úměrně zvětší i počet vibračních prvků v hlavici, je potřeba jednotlivé dvojice izolovat tak, aby nebyly ovlivňovány jiným než svým vibračním prvkem. Piezokeramické měniče použité v tomto konceptu hlavice dokázaly být za pomoci silikonové izolace odseparované tak, že jednotlivé vibrační prvky dávkovaly materiál pouze svojí pipety a nedocházelo k chybnému nanášení. Problém ale nastával u dodávání prášku z malého zásobníku, jelikož vibrace byly tak malé, že nedokázaly bortit ustálenou strukturu většího množství prášku v zásobníku. Z tohoto důvodu docházelo v procesu nanášení k občasnému vynechávání, nebo k nedostatečnému přívodu nanášeného materiálu. Ukázalo se taky, že vibrace nejsou dostačující pro nanášení některých materiálů. Z těchto důvodů, byl první koncept testován i ve variantě s dvěma vibračními motorky, u kterých naopak nebylo dosaženo dostatečné izolace jednotlivých nanášecích prvků.

Druhý testovaný koncept multimateriálové hlavice používá k nanášení prášku pouze jednu společnou mosaznou trysku a pro buzení vibrací plochý vibrační motorek. S tímto testovacím konceptem bylo možné nanášet již všechny materiály a byl eliminován problém s dodávkou prášku z malého zásobníku. Z důvodu použití pouze jedné trysky pro oba práškové materiály byla na mikroskopu taky prověřena míra kontaminace nánosů, která se však neprokázala.

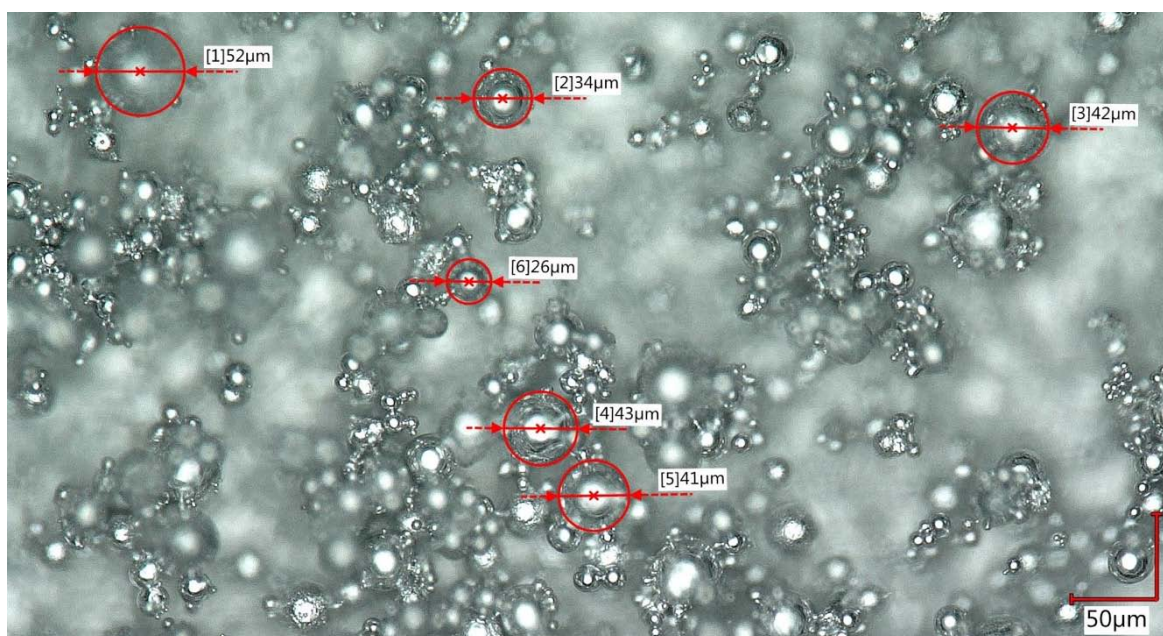


Obr. 5-4: Porovnání nanesené vrstvy při použití rozdílných nanášecích prvků: A) tryska, B) pipeta

Jelikož testované koncepty využívají dva druhy nanášecích prvků, byl pro porovnání pipety a trysky vykonán experiment nánosu obdélníku (70 x 80) mm (viz Obr. 5-4). Oba nanesené obdélníky dosáhly dobrého výsledku a téměř identické struktury nánosu. Na základě výsledků experimentů vykonaných s koncepty hlavice, bylo rozhodnuto, že pro určování nanášecích parametrů bude používán již pouze druhý koncept nanášecí hlavice pro dva materiály (viz Kapitola 4.6.2).

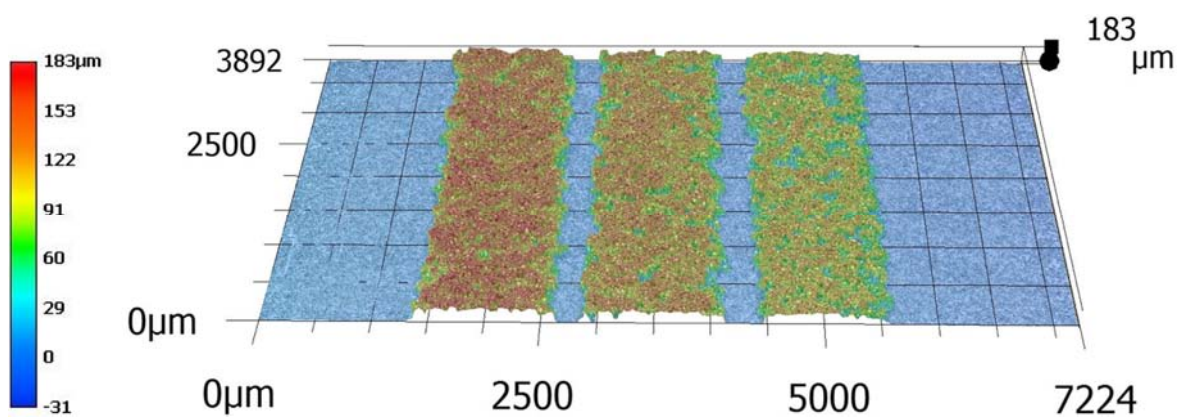
Tloušťka nanášené vrstvy

Zařízení SLM 280HL standardně zpracovává vrstvy v rozmezí 20 μm – 100 μm , přičemž nejpoužívanější z nich je tloušťka vrstvy 50 μm . U volby rozhraní, které chceme testovat, musí být brána v potaz velikost částic testovaného prášku. Pro primární experimenty byl použit hliníkový prášek ENAW2618, který má velikost částic 10 μm – 52 μm (viz Obr. 5-5). Na základě těchto informací bylo stanoveno testovací rozhraní v rozmezí 55 μm - 170 μm .

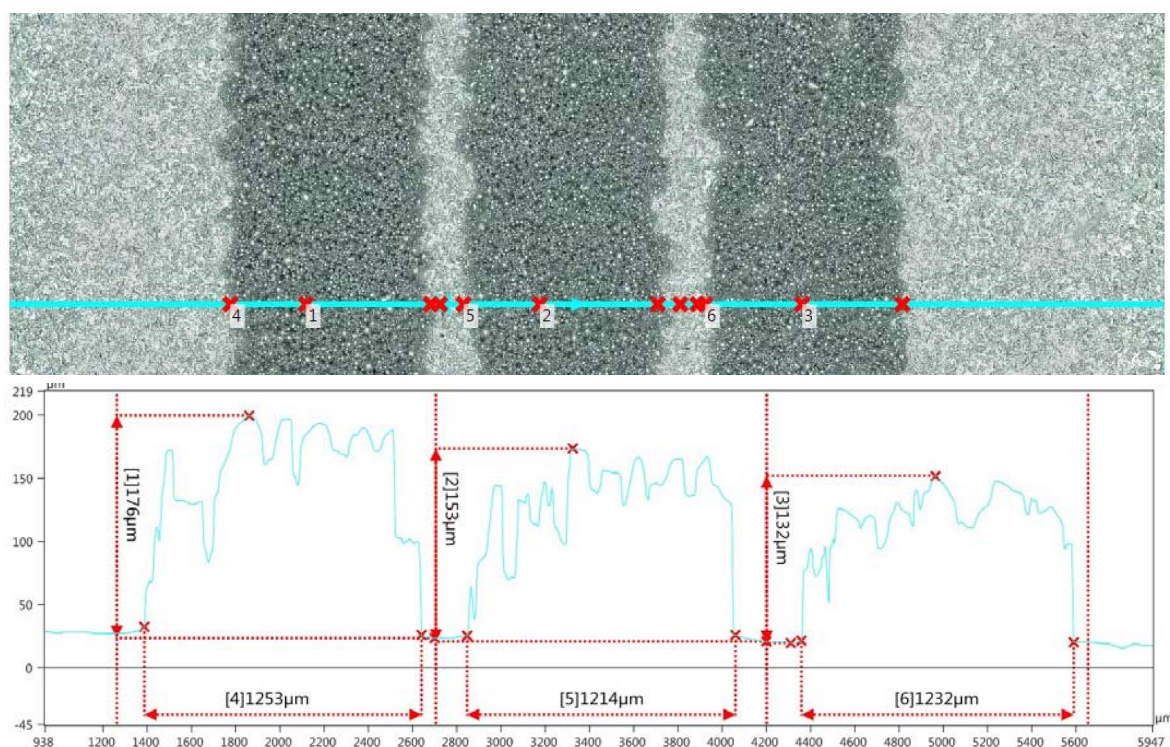


Obr. 5-5: Částice práškového materiálu ENAW2618

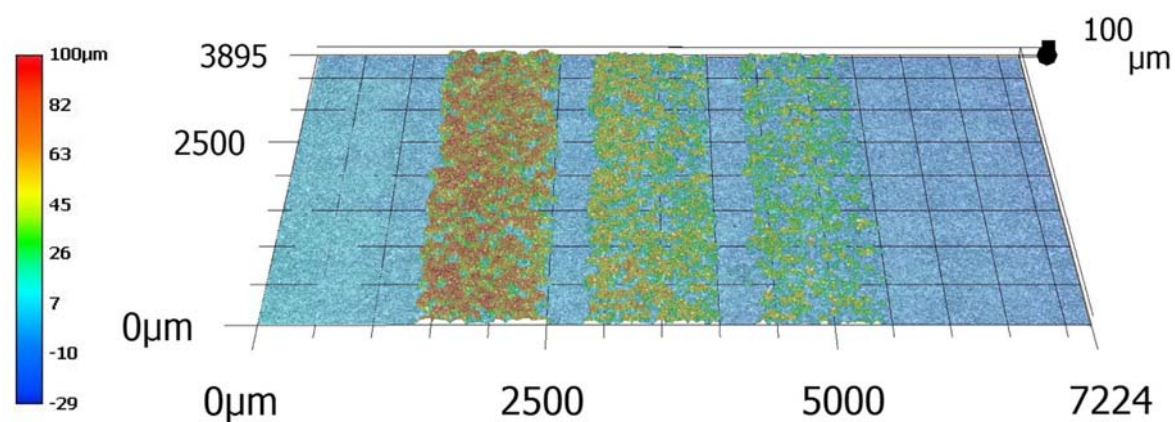
Pro náhled do vrchní úvratě testovaného intervalu byly zkoumané hodnoty 170 μm , 150 μm a 130 μm (viz Obr. 5-6 a Obr. 5-7). Důvod, proč bylo testováno rozhraní až v těchto hodnotách je ten, že v článcích Chianrabutra [24] a Zhang [15] bylo pracováno s výškou vrstvy 100 μm - 150 μm . Pro přiblížení se k standardně používané tloušťce vrstvy, byly zvoleny hodnoty 55 μm , 70 μm a 100 μm (viz Obr. 5-8 a Obr. 5-9). Oba experimenty byly vykonány za konstantní provozní rychlosti 600 mm/min a s pracovním napětím vibračního motorku 5 V.



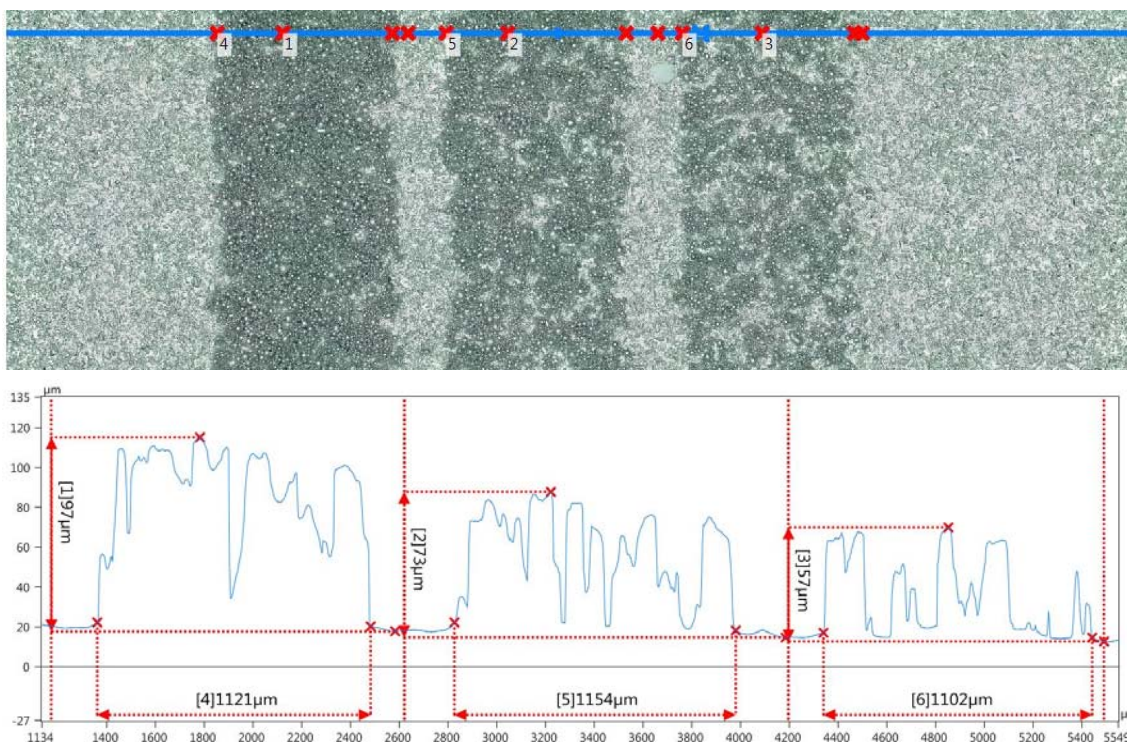
Obr. 5-6: Rovnoměrnost nánosu testovacích vrstev o výšce 170 μm, 150 μm a 130 μm.



Obr. 5-7: Průřez nánosem testovacích vrstev o výšce 170 μm, 150 μm a 130 μm.



Obr. 5-8: Rovnoměrnost nánosu testovacích vrstev o výšce 100 μm, 70 μm a 55 μm.



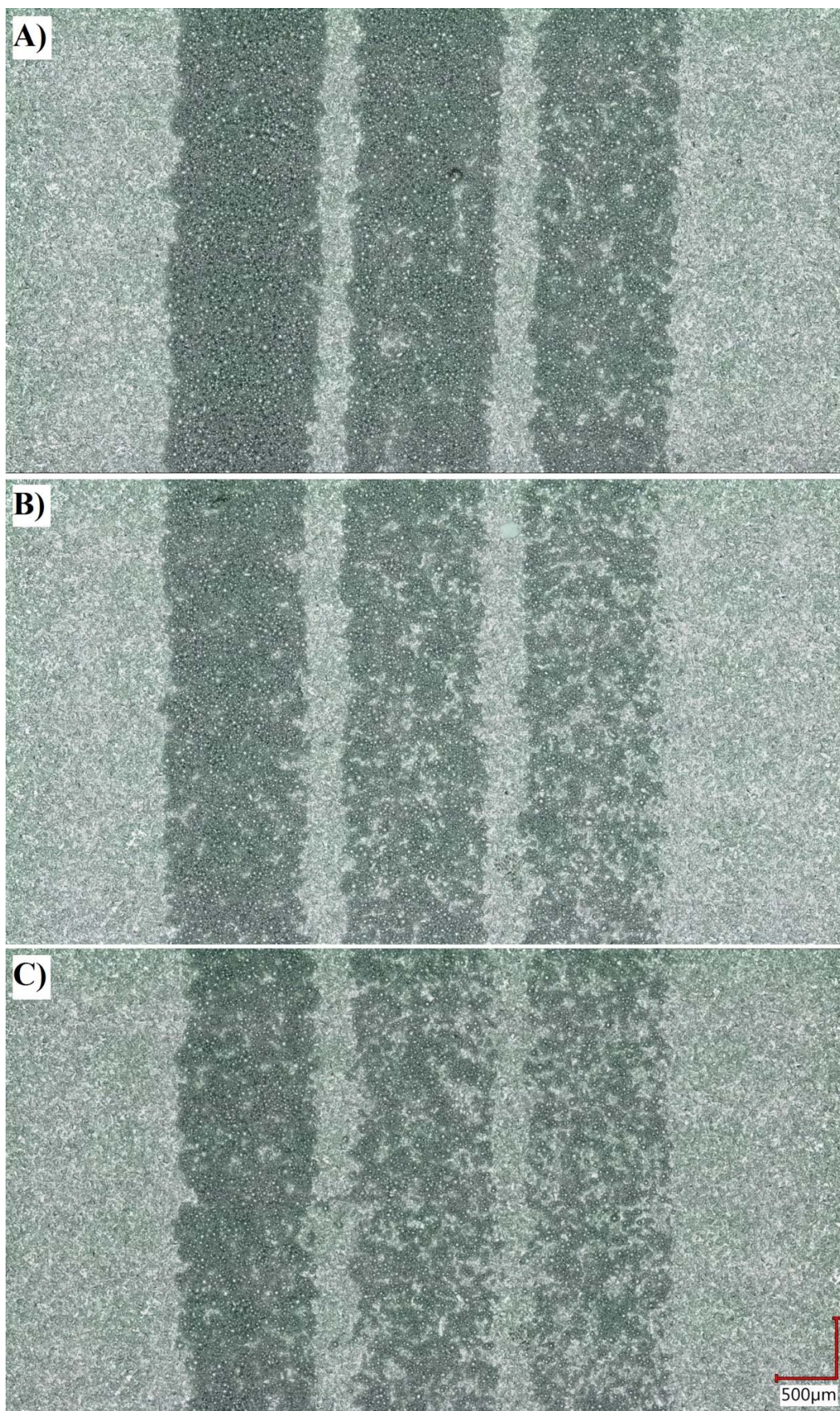
Obr. 5-9: Průřez nánosem testovacích vrstev o výšce 100 μm , 70 μm a 55 μm .

Z vykonaných experimentů je možné vidět, že nanášené vrstvy s tloušťkou větší než 100 μm jsou nanášené rovnoměrně, a naopak vrstvy menší než 100 μm již vykazují mírné známky nedokonalosti, jelikož prášek není rovnoměrně rozdělován. Každopádně, jedná se o experiment nanášení první vrstvy materiálu, která může být ovlivněna nerovností vybroušené platformy SLM. Z tohoto důvodu je pro lepší popsání parametru tloušťky nanášené vrstvy nutno taktéž otestovat nanášení na již vypálenou vrstvu prášku v průběhu procesu tisku.

Rychlost nanášení

Dalším zkoumaným parametrem byla rychlost nanášení. Tento parametr je velice důležitý, protože technologie 3D tisku mají velkou časovou náročnost. Pro zjištění míry ovlivnění kvality nánosu zvyšující se rychlostí byly zvoleny rychlosti 600 mm/min, 1500 mm/min a 3000 mm/min (viz Obr. 5-10). Aby bylo možné zhodnotit vliv rozdílných rychlostí na různé tloušťky nanášených vrstev, byly pro tento experiment použity tloušťky vrstvy 100 μm , 70 μm a 55 μm . Pro všechny experimenty bylo na vibračním motorku použito stálé pracovní napětí 5 V.

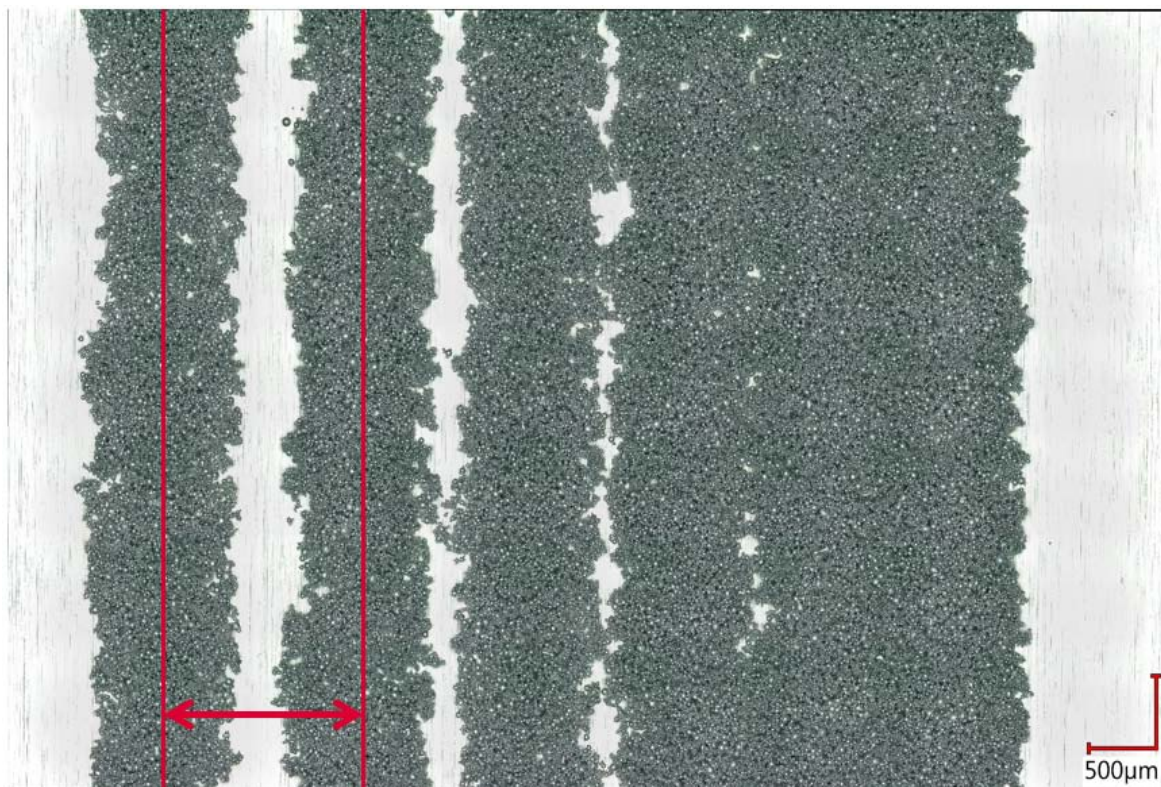
Na základě vykonaných experimentů je možné zhodnotit, že zvyšující se rychlost, má velký vliv na kvalitu distribuce prášku v nanášené vrstvě. Výrazného zhoršení kvality nanášené vrstvy je vidět na tloušťkách 70 μm a 50 μm , přičemž vrstva o tloušťce 100 μm zaznamenala pouze menší pokles kvality. Při volbě tohoto parametru je zapotřebí zvážit zrychlení celkového procesu výroby na úkor drobných nedostatků v nanášené vrstvě, které v prvotní výzkumné fázi nemusí mít tak závažný vliv.



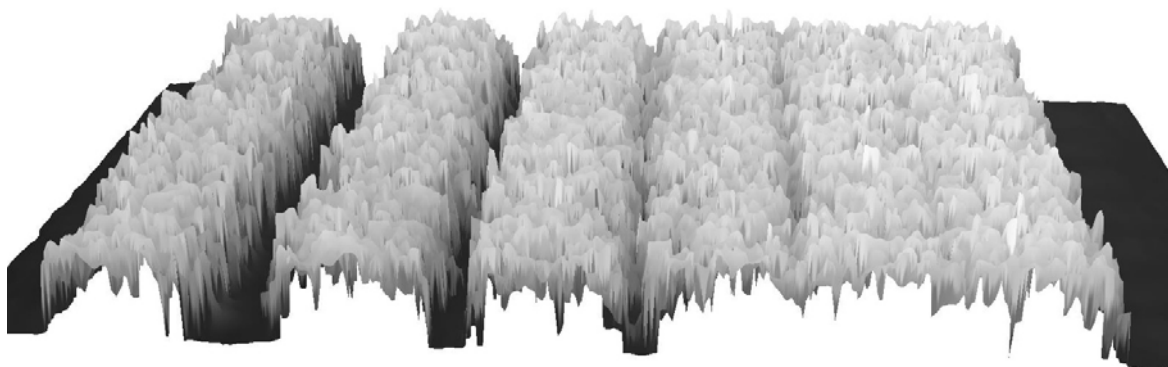
Obr. 5-10: Nanášení vrstev o výšce 100 µm, 70 µm a 55 µm různými rychlostmi. Nanášecí rychlost: A) 600 mm/min. B) 1500 mm/min. C) 3000 mm/min.

Vzdálenost mezi řádky (Hatch distance)

Pro vytvoření souvislé vrstvy materiálu je nutno prozkoumat návaznost jednotlivě nanesených řádků. Tento parametr se v praxi označuje anglickým názvem „hatch distance“. Je zapotřebí zvolit takovou vzdálenost řádků, aby mezera mezi nimi byla zanedbatelná a řádky splynuly v jednu souvislou vrstvu. Jelikož z experimentů tloušťky nanášené vrstvy bylo zjištěno že nanesený řádek má šířku přibližně 1,1 mm, byly pro vykonání tohoto experimentu zvolené vzdálenosti 1,5 mm, 1,3 mm, 1,2 mm 1,1 mm a 1 mm (viz Obr. 5-11 a Obr. 5-12). Pro vykonání tohoto experimentu byla použita tloušťka nanášené vrstvy 100 μm , rychlost nanášení 600 mm/min a napětí vibračního motorku 5 V.



Obr. 5-11: Testování různých vzdáleností mezi řádky (hatch distance). Vzdálenost mezi řádky: 1,5 mm, 1,3 mm, 1,2 mm 1,1 mm a 1 mm

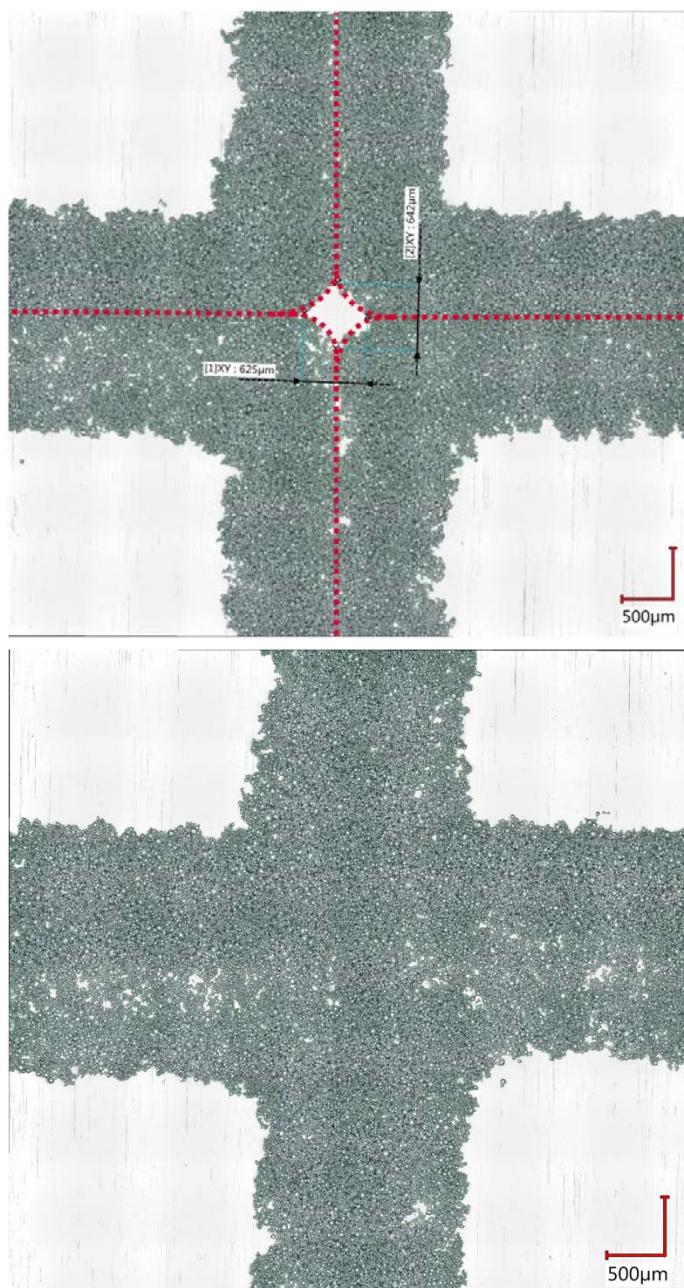


Obr. 5-12: Monochromatický pohled na testování různých vzdáleností mezi řádky (hatch distance) s 10krát zvětšenou výškou profilu. Vzdálenost mezi řádky: 1,5 mm, 1,3 mm, 1,2 mm 1,1 mm a 1 mm

Z vytvořeného monochromatického pohledu na vykonaný experiment je zřejmé, že pro nanášenou vrstvu o tloušťce 100 μm , je vzdálenost mezi řádky 1 mm dostatečná pro vytvoření celistvé vrstvy s rovnoměrnou distribucí naneseného materiálu.

Analýza kontaktu čtyř rohů

Pro použití kontinuálního nanášení celistvé vrstvy je téměř vždy nutno rozdělit nanášenou oblast na menší, postupně nanášené sektory. V průběhu rozdělování platformy na jednotlivé sektory a vytváření příslušných pohybových příkazů je zapotřebí eliminovat možné mezery, které vznikají v kontaktu rohů jednotlivých sektorů. Tato chyba je způsobena kruhovým tvarem nanášecího otvoru trysky. Vzniklou chybu je možné eliminovat redukcí vzdálenosti mezi kontaktními řádky o 0,3 mm.



Obr. 5-13: Ukázka vzniklé chyby v kontaktu rohů čtyř nanášených sektorů a její možnost eliminace

Aplikace zjištěných parametrů

Na základě předešlých experimentů byly vybrány jednotné nanášecí parametry pro všechny testované materiály (viz Tab. 5-1). Za použití těchto parametrů byly naneseny čtyři sousedící sektory tvaru čtverce o rozměru (8 x 8) mm, každý z jiného materiálu. Experimentem se zjišťuje možnost sjednocení nanášecích parametrů pro vybrané materiály, což by umožnilo využití stejných pohybových příkazů v procesu nanášení pro různé materiály. Pro tvorbu pohybových příkazů tohoto experimentu byla pro eliminaci chyby použita redukce vzdálenosti řádků o 0,3 mm.

Tab. 5-1: Jednotné nanášecí parametry definované pro zvolené materiály

Průměr trysky	Napětí plochého vybračního motorku	Tloušťka nanášené vrstvy	Rychlost nanášení	Vzdálenost mezi řádky
1 mm	5 V	100 μ m	3000 mm/min	1 mm



Obr. 5-14: Nanesená vrstva složená ze čtyř materiálů

Na základě vykonaného experimentu je možné vidět a následně vyhodnotit kvalitu nanesených sektorů, vytvořených způsobem kontinuálního nanášení z různých prášků, za použití stejných nanášecích parametrů. Je viditelné že materiál Cu7.2Ni nedosáhl dobrého výsledku a pro jeho zlepšení je nutné upravit vzdálenost mezi řádky. U materiálu ENAW2618 bylo dosaženo lepšího výsledku, avšak v spodní části nanášeného sektoru jsou pořád pozorovatelné malé mezery způsobené nedostatečnou redukcí vzdálenosti řádků. Na sektorech vytvořených z materiálů FeAm a 316L je možné vidět rovnoměrné nanesení materiálu v celém sektoru.

5.1.3 Zhodnocení vývojové části a v ní dosažených výsledků

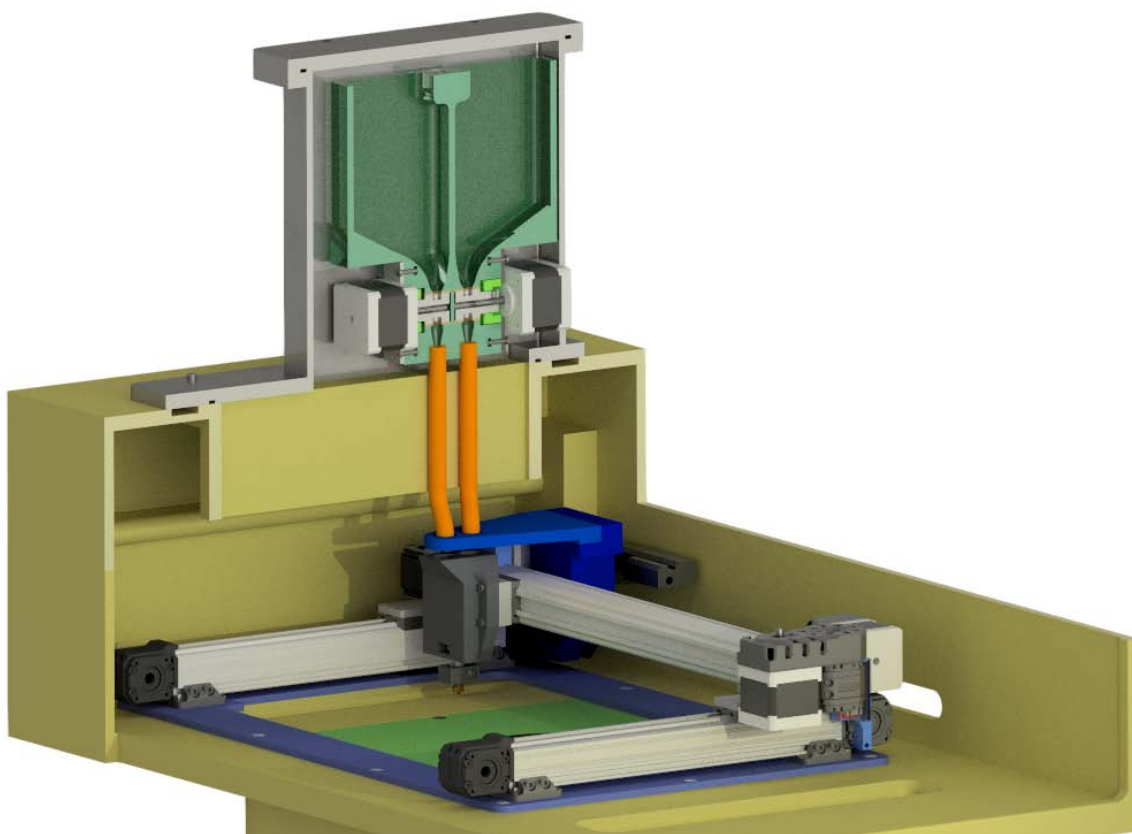
Na základě vykonaných testů bylo dosaženo závěru, že zvolené nanášecí prvky (pipeta a tryska), dosahují z hlediska rovnoměrnosti distribuce prášku a celistvosti nanášené vrstvy srovnatelných výsledků. Z konstrukčního hlediska je výhodnější použití trysky, kvůli její jednoduché zaměnitelnosti a materiálu odolnějšímu vůči poškození v případě kolize.

Piezokeramické měniče, použité v prvním koncepčním řešení (viz Kapitola 4.6.1), jsou vhodné pro použití v hlavici s více pipetami, jelikož měniče svými nízkými vibracemi neovlivňují sousední pipety. Na druhou stranu, nízké vibrace nebyly schopny nanášet všechny testované materiály a způsobovaly občasné vynechávání dodávky prášku z malého zásobníku. Druhé koncepční řešení (viz Kapitola 4.6.2), které k buzení vibrací využilo plochý vibrační motorek dokáže nanášet všechny testované materiály, a díky větším vibracím nedochází k vynechávání dodávky prášku z malého zásobníku. Pro dosažení plynulého nanášení a variability nanášecí hlavičky z hlediska testování různých materiálů je tedy na úkor použití více pipet vhodnější druhé koncepční řešení s plochým vibračním motorkem.

Z vykonaných experimentů je dále vidět, že nejkvalitnějšího nánosu při použití jednotných nanášecích parametrů (viz Tab. 5-1), bylo dosaženo s materiály 316L a FeAm. Proto budou tyto materiály použity k demonstraci funkce nanášecího zařízení v tiskárně SLM 280HL a taky s nimi bude vykonán experimentální tisk 3D multimateriálového dílu.

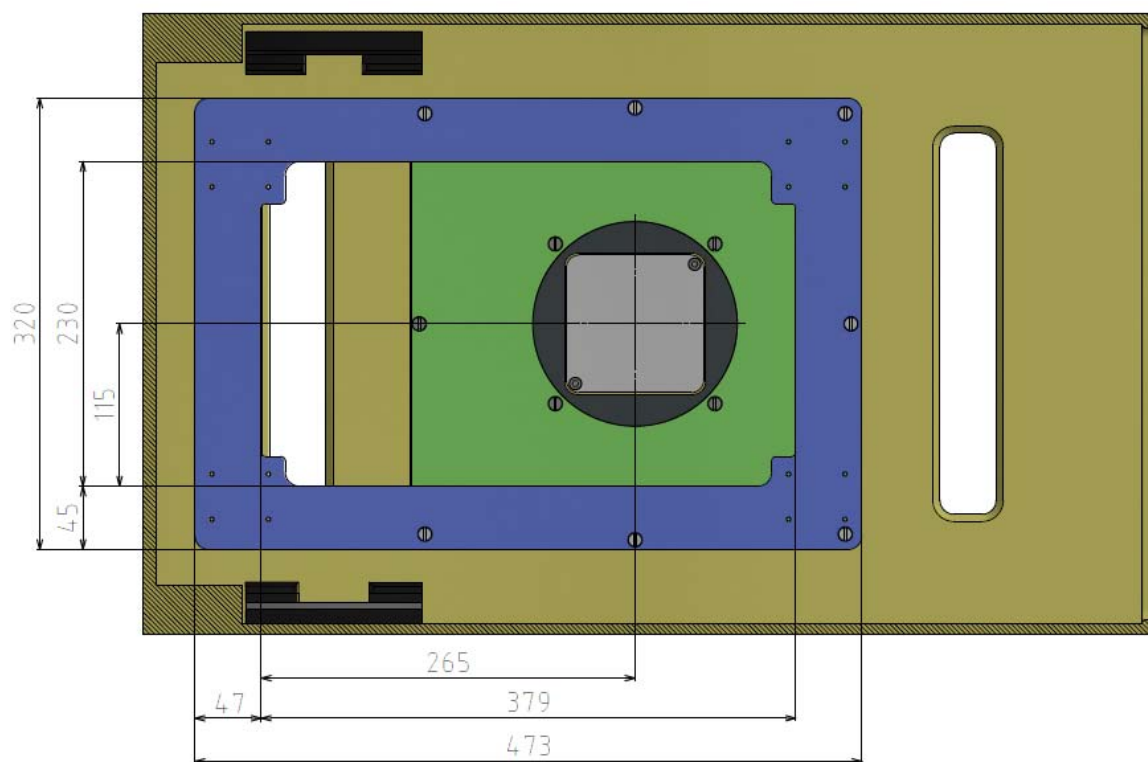
5.2 Konstrukční část

Díky podrobnému rozpracování a analýze jednotlivých uzlů tohoto zařízení v průběhu vývojové části (viz Kapitola 5.1) bylo možné na základě již otestovaného externího nanášecího zařízení navrhnout finální podobu nanášecího zařízení pro tiskárnu SLM 280HL (viz Obr. 5-15).



Obr. 5-15: Model nanášecího zařízení

5.2.1 Konstrukce nanášee



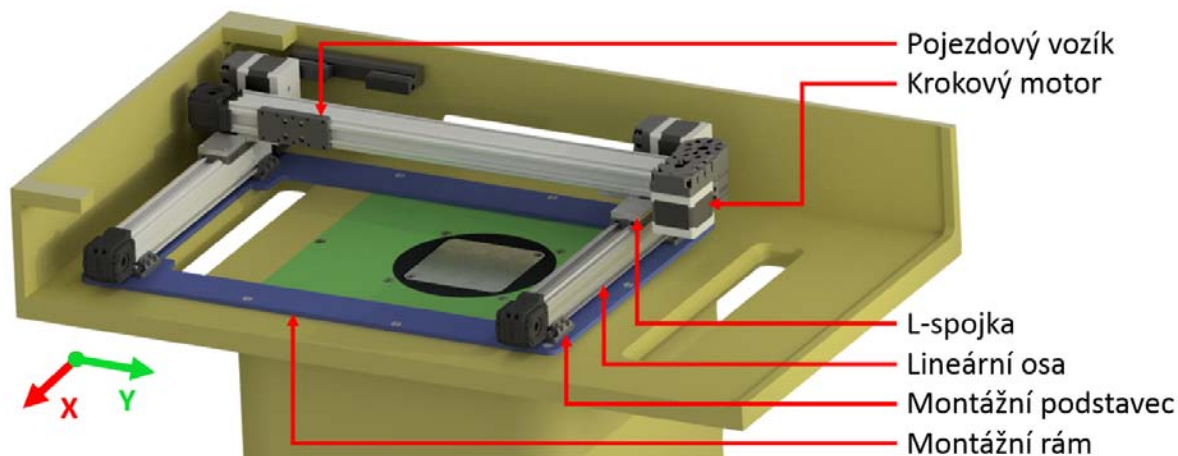
Obr. 5-16: Pozice a základní rozměry montážního rámu nanášecího zařízení v komoře tiskárny

Pro zabezpečení jednoduché možnosti montáže, demontáže a manipulace s tvořeným nanášecím zařízením, byl do komory tiskárny navržen montážní rám, který bude sloužit jako fixní podstava pro celé zařízení (viz Obr. 5-16). Montážní rám bude vyřezán vodním paprskem z hliníkového frézovaného polotovaru o tloušťce 5 mm a upevněn do komory tiskárny za pomoci sedmi šroubů, které procházejí skrze rám do původních montážních děr redukčního rámečku.

Instalace pohybového vedení

Pro zabezpečení pohybu nanášecí hlavičky v komoře tiskárny byly použity tři lineární osy MJUNIT – MJ30X (viz Tab. 4-1). První dvě osy, navržené pro vykonávání pohybu v ose „x“, se použitím montážních podstavců originálně dodaných s lineárními osami (viz Obr 5-17), namontují pomocí šroubů, do připravených děr v montážním rámu (viz Obr 5-16). Orientace lineárních os byla zvolena tak, aby nepřekážely proudění inertní atmosféry. Ze stejného důvodu nemůžou být tyto dvě lineární osy přepojeny pro použití pouze jednoho pohonu, ale každá musí disponovat vlastním krokovým motorem.

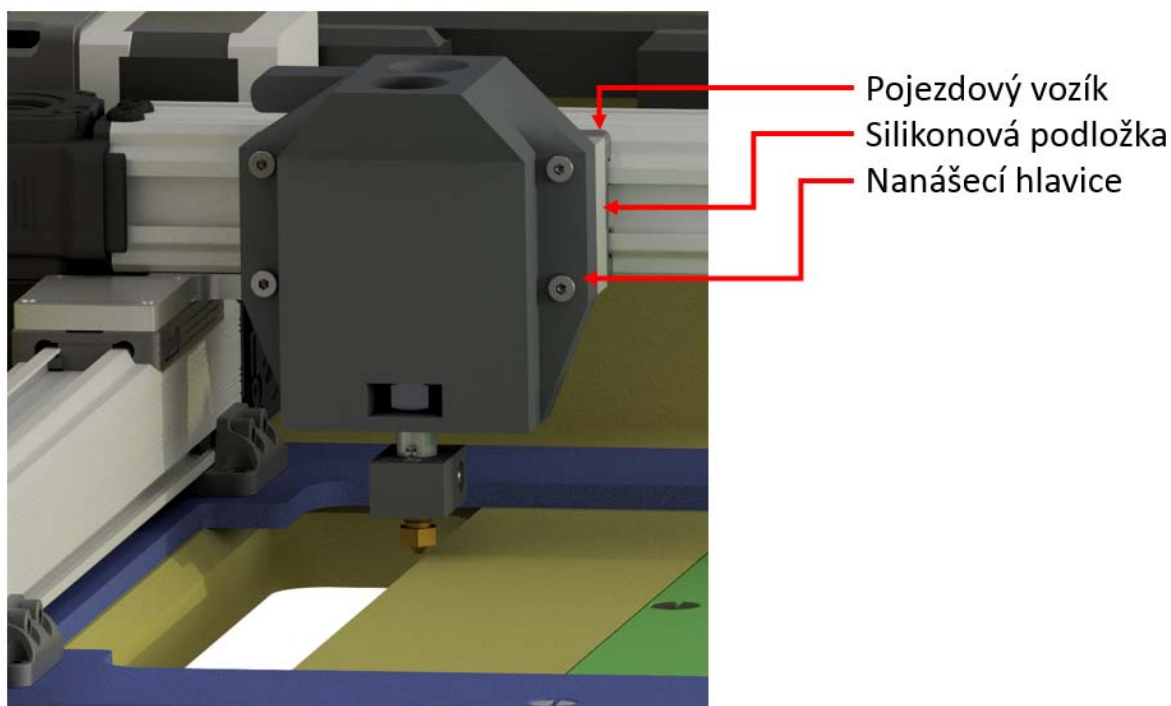
Aby mohl montážní rám dolehnout na dno komory, použité šrouby nepřesahují dno montážního rámu. Lineární osy se připojí k montážním podstavcům za pomoci spojovacích maticek umístěných v bočních drážkách profilu osy. Třetí lineární osa, navržená pro vykonávání pohybu v ose „y“, se uloží na jejich pojezdové vozíky, pootočená o 90°, a upevní se vyrobenou L-spojku pomocí spojovacích maticek umístěných v bočních drážkách profilu osy. Každá lineární osa již disponuje svým vlastním krokovým motorem NEMA 17.



Obr. 5-17: Popis dílů pohybového vedení nanášecího zařízení

Instalace nanášecí hlavičky

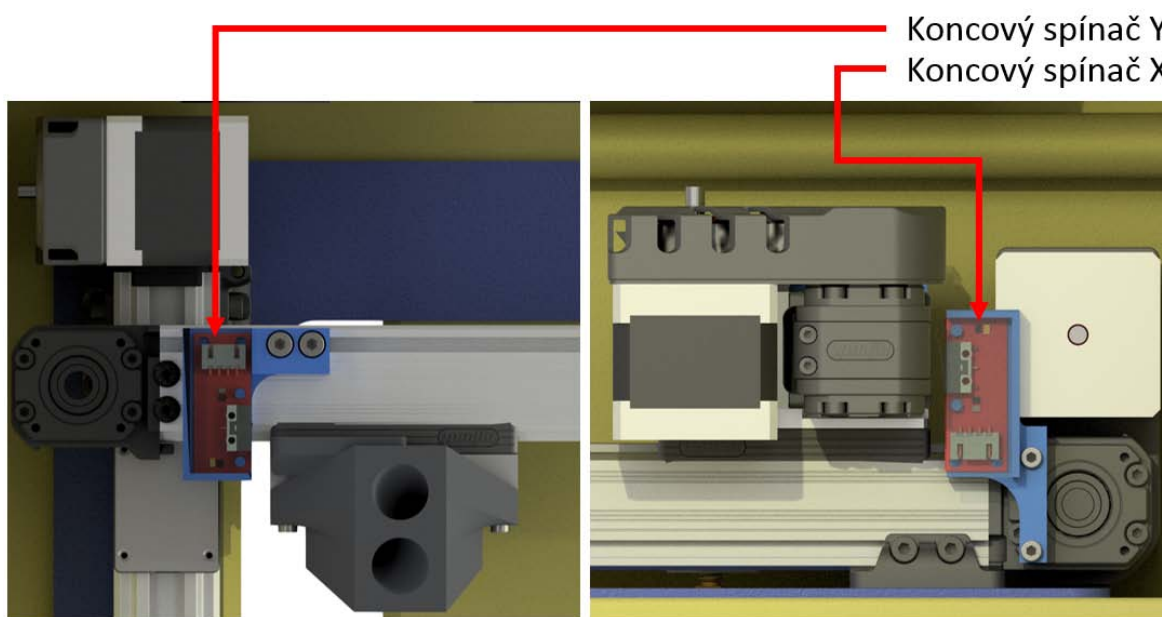
Pro použití v tiskárně byla upravena násypka druhého koncepčního řešení nanášecí hlavičky (viz Obr. 5-18), a to z důvodu nutnosti kompatibility s dokovací stanicí, ve které bude probíhat průběžné doplňování materiálu z hlavního zásobníku. Hlavička byla ukotvena k pojezdovému vozíku osy „y“ přes silikonovou podložku o tloušťce 7 mm, za účelem odizolování vibrací pružným uložením. Princip fungování této nanášecí hlavičky již byl otestován (viz Kapitola 5.1) a je připraven pro aplikaci v tiskárně.



Obr. 5-18: Nanášecí hlavice namontovaná na pohybovém vedení

Instalace koncových snímačů

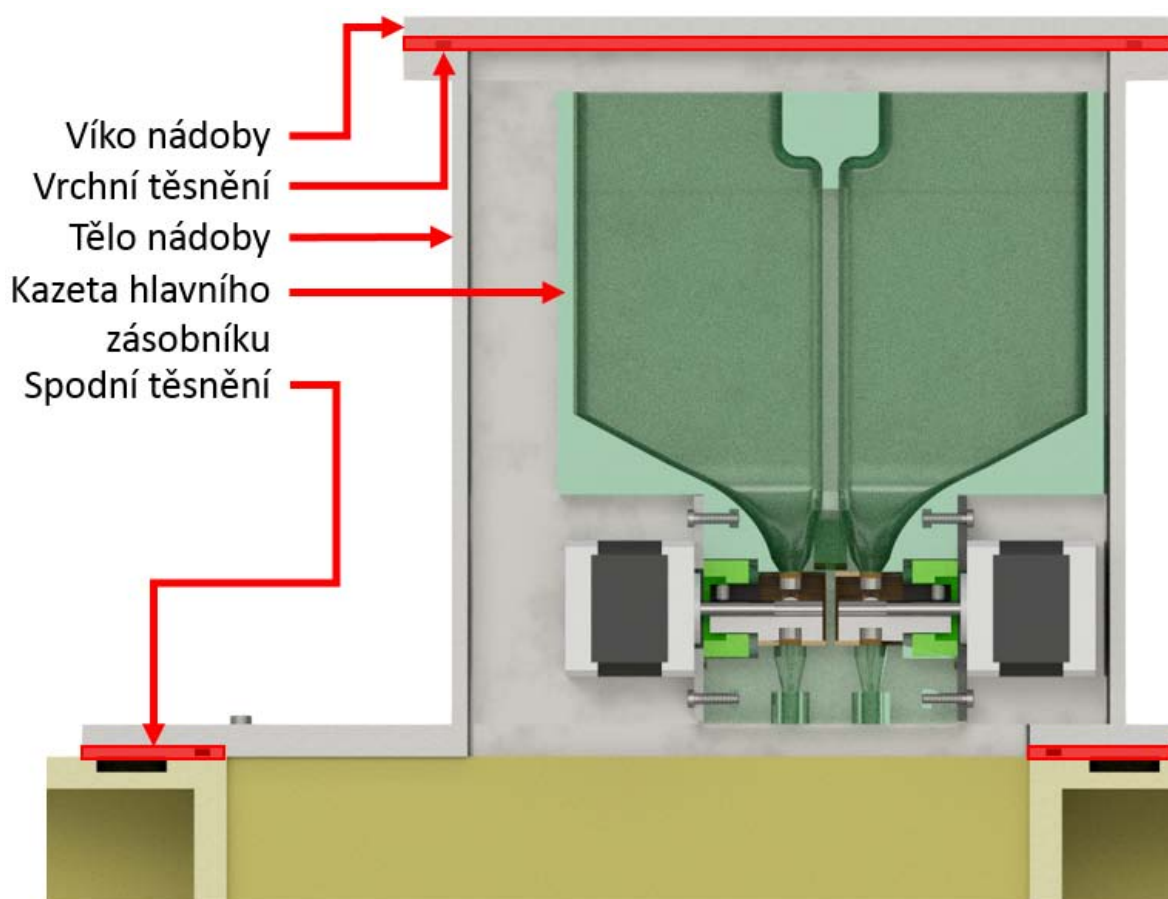
Pro obě osy posuvu byly použity koncové spínače, které společně se softwarovým nastavením ohraničují pohybový prostor nanášecí hlavice. Koncové snímače jsou velice důležitým komponentem pro dosažení dobré opakovatelnosti pozice a také úspěšné synchronizace s laserem tiskárny. Pro každý spínač byl za pomoci 3D tisku vytvořený držák na míru (viz Obr. 5-19), aby byla možná jednoduchá montáž ke konstrukčním prvkům lineárních os.



Obr. 5-19: Umístění koncových snímačů

5.2.2 Konstrukce hlavního zásobníku prášku

Nový hlavní zásobník byl navržen tak, aby byl schopen kontrolovaně doplňovat dva druhy materiálů do malého zásobníku umístěného v nanášecí hlavici. Za tímto účelem byla z hliníkových polotovarů svařena nádoba o rozměrech (100 x 340 x 230) mm, která je upevněna k tiskárně pomocí stejných upevňovacích prvků jako originální hlavní zásobník. Tato nádoba je utěsněná za pomoci dvou plochých silikonových těsnění o tloušťce 7 mm, sendvičově umístěných mezi tiskárnou, nádobou a víkem nádoby (viz Obr. 5-20).



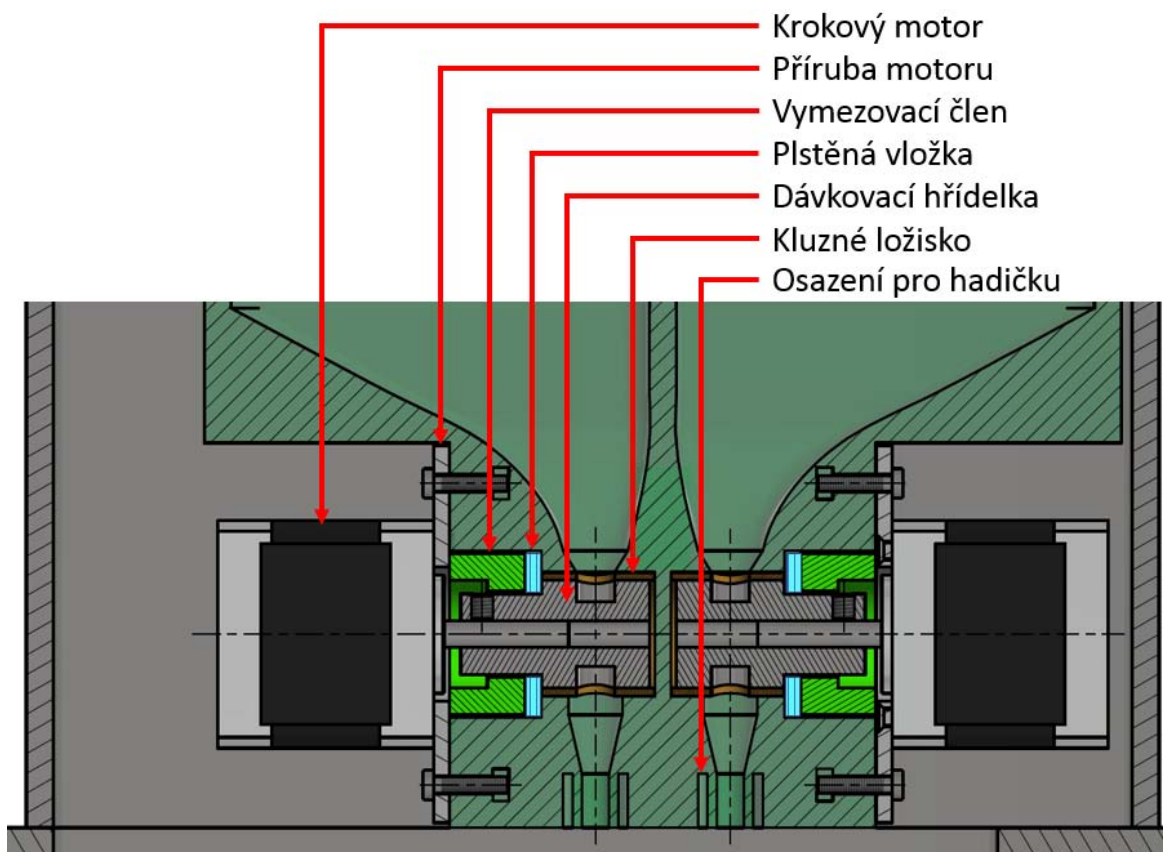
Obr. 5-20: Popis dílů hlavního zásobníku

Instalace kazety hlavního zásobníku

Kazeta hlavního zásobníku je vyrobena pomocí 3D tisku z materiálu ABS a slouží k uskladnění veškerého prášku potřebného na vykonání dané stavby multimateriálového dílu. Kazeta se skládá z dvou oddělených zásobníků o objemu 233 cm³, přičemž každý z nich disponuje v spodní části nádoby svým vlastním dávkovacím mechanismem (viz Obr. 5-21). Kazeta je umístěná uvnitř hliníkové nádoby hlavního zásobníku.

Dávkovací mechanismus kazety funguje na principu dávkovací hřídelky. Hřídelka s čtyřmi zafrézovanými kruhovými dírami o objemu 131 mm³ rotuje v převrtném kluzném ložisku a reguluje tak přepadávání prášku skrze tento mechanismus v kontrolovaných dávkách daného objemu. Rotace hřídelky je řízená krokovým motorem NEMA 17 upevněným

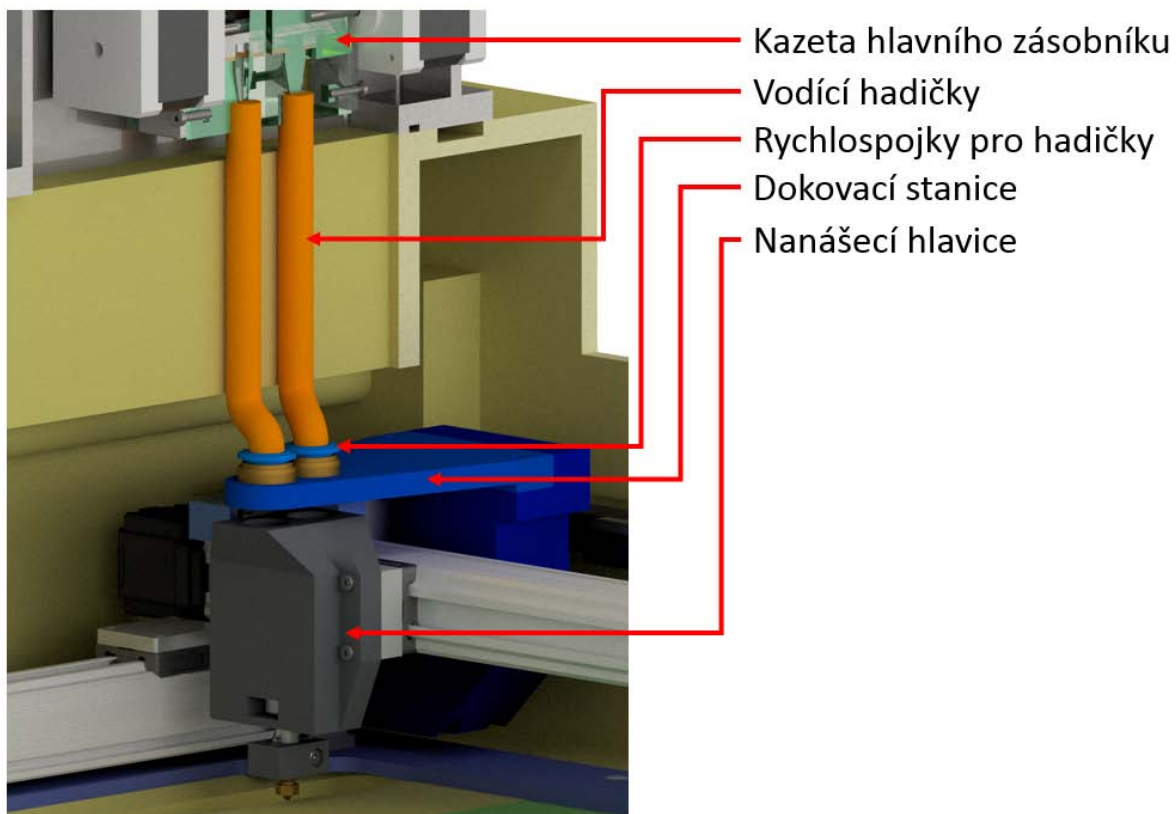
k boční straně kazety. Hřídelka je na straně motoru utěsněná plstěnou vložkou a její poloha je zafixována vymezovacím členem.



Obr. 5-21: Popis dílů dávkovacího mechanismu kazety hlavního zásobníku

Instalace dokovací stanice

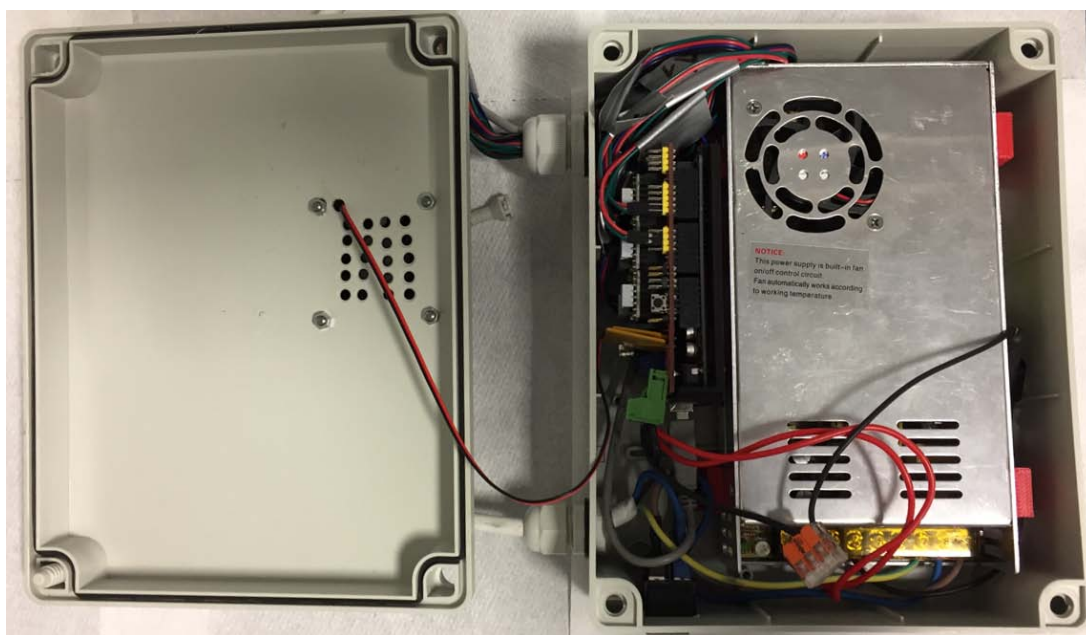
Dokovací stanice byla vytvořena pro zaručení přepadávání dávkovaných prášků z hlavního zásobníku do příslušných nádob malého zásobníku v nanášecí hlavici (viz Obr. 5-22). Stanice obsahuje nosnou platformu složenou ze dvou dílů vyrobených na 3D tiskárně z materiálu ABS. Tato nosná platforma je fixně namontovaná na stacionární část jedné z lineárních os tak, že nad ní se nachází plnicí přepad a pod ní nulová pozice nanášecí hlavice. V nosné platformě, nad pozicemi jednotlivých nádob malého zásobníku, jsou umístěny dvě rychlospojky pro hadičky vedoucí skrze plnicí přepad přímo do kazety hlavního zásobníku. Hadičky jsou v kazetě zastrčené do připravených osazení (viz Obr. 5-21) okolo výstupního otvoru tak, že je zamezeno úniku prášku mimo hadičku. Když tedy bude nanášecí hlavice ve svojí výchozí nulové pozici, bude moci probíhat proces kontrolovaného doplňování prášku přímo do malého zásobníku, bez rizika nepřesného plnění, nebo kontaminace. Vzdálenost mezi násypkou nanášecí hlavice a dokovací stanicí je 1 mm.



Obr. 5-22: Popis dílů dokovací stanice

5.2.3 Externí řídicí systém

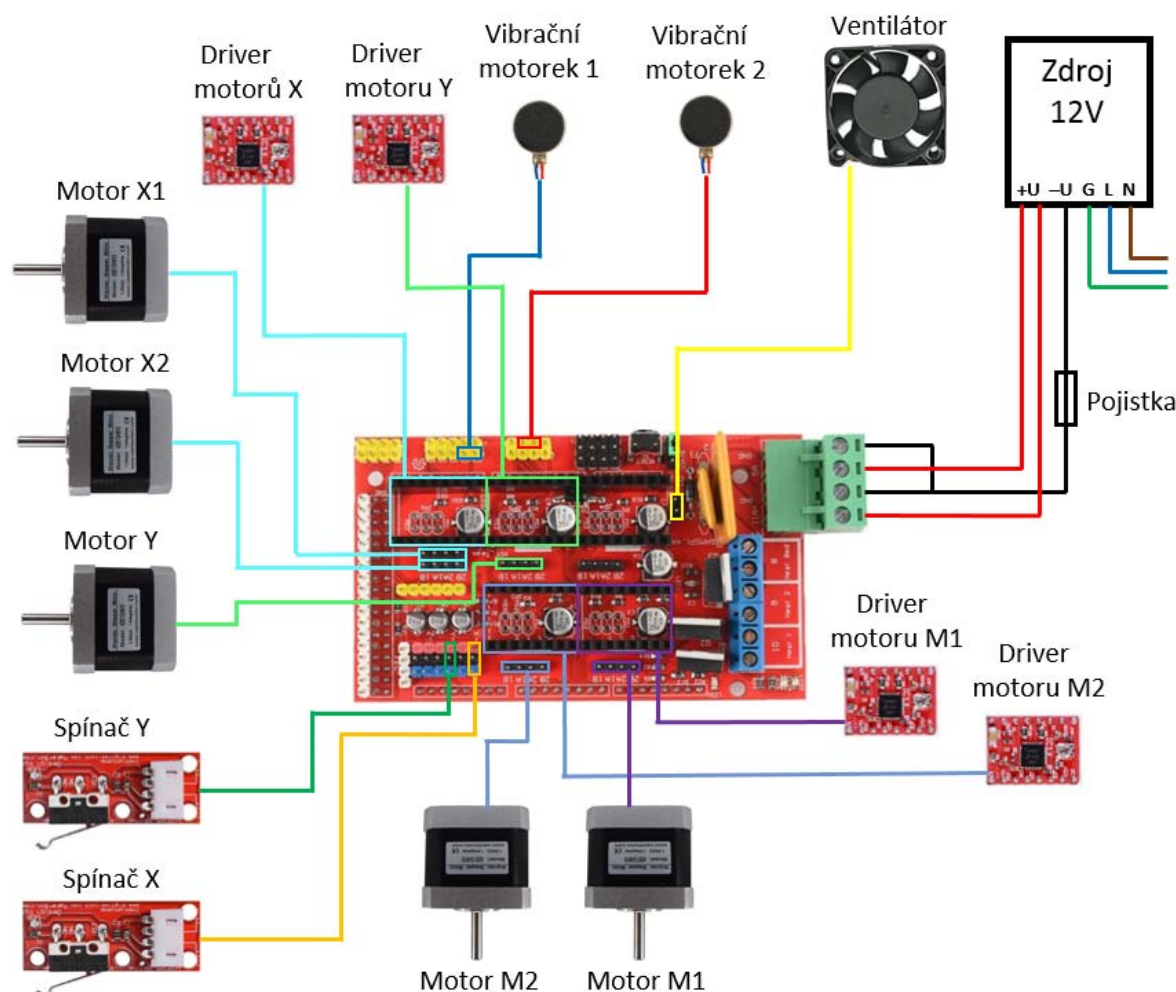
Externí řídicí systém řídí veškerou elektroniku navrženého nanášecího zařízení a nového hlavního zásobníku. Cílem tohoto ovladače je seskupení ovládání všech potřebných procesů do jednoho řídicího rozhraní.



Obr. 5-23: Rozvodová krabice elektroniky

Zapojení elektroniky

Elektronika nanášecího zařízení je umístěná v jedné rozvodové krabici s aktivním chlazením pomocí zakomponovaného ventilátoru (viz Obr. 5-23). Použit byl zdroj stejnosměrného proudu o napětí 12 V. Z něj je následně napájena řídící deska Arduino Mega 2560 s napojením na Ramps 1,4. Na desce Ramps 1,4 byly k řazení motorů použity Integrované drivery Allegro A4988 DMOS. Do této desky bylo následně zapojeno pět krokových motorů, dva vibrační motorky, dva koncové snímače a ventilátor (viz Obr. 5-24). Z desky Arduino Mega 2560 byl taky vyveden USB kabel pro možnost napojení k počítači a ovládání procesu online.



Obr. 5-24: Schématické zapojení elektroniky nanášecího zařízení do desky Ramps 1,4

Kabeláž

Vedení kabelů elektroniky bylo řešeno využitím drážek profilů lineárních os a také upevněním ke zdi komory tiskárny SLM 280HL, aby v průběhu procesu nedošlo ke zachycení. Jak už bylo řečeno, tiskárna vyžaduje pro spuštění procesu tisku vysokou míru vzduchotěsnosti v komoře. Z tohoto důvodu byla vyrobena speciální záslepka aplikovatelná do trubice odpadového kanálu (viz Obr. 5-25). Originální záslepka trubice byla převrtána a vložila se do ní silikonem utěsněná vývodka pro kabely. Aby byla možná jednoduchá

montáž a demontáž elektroniky, kabely jsou za záslepkou z vnitřní strany stroje sloučeny do třech rozpojitelných konektorů.



Obr. 5-25: Vyvedení kabelů z komory tiskárny SLM 280HL

Vytvoření řídicího skriptu

Cílem vytvořeného řídicího skriptu byla možnost ovládání většiny procesu pomocí jednoho G-kódu (viz Tab. 5-3). Pro dosažení sjednoceného ovládání bylo za potřeby naprogramovat skript pro řídicí desku Arduino Mega 2560 a zabezpečit tak rozpoznávání veškerých příkazů potřebných pro automatické nanášení vrstvy navrženým zařízením. Skript byl naprogramován tak, aby ho bylo možné řídit za pomoci příkazů v podobě G-kódu (viz Tab. 5-2) a k ovládání veškerých komponent (viz Obr. 5-24) bylo možné využít pracovního rozhraní Repetier-Host. Jako podklad pro vytvoření řídicího skriptu byl použit firmware Marlin-1.1.x, který se standardně používá k ovládání 3D tiskáren.

Řídicí systém s částečnou automatizací byl navržen tak, že operátor vloží do připraveného pracovního rozhraní Repetier-Host nanášecí trajektorie požadované multimateriálové vrstvy ve dvou samostatných G-kódech, každý určený pro jeden materiál (viz Tab. 5-3). Od tohoto momentu vykonává veškeré úkony stroj sám a operátor pouze před každou vrstvou manuálně zvolí, kterou kombinaci požaduje nanést. Na výběr má z materiálu 1 nebo 2, a nanášecích trajektorií A nebo B. Pracovní rozhraní dovoluje uložení až pěti různých nanášecích trajektorií pro stavbu.

Tab. 5-2: Seznam komponent a jejich nastavená definice v G-kódu

Komponenta	Zastoupení v G-kódu
Motor X1	X
Motor X2	X
Motor Y	Y
Dávkovač materiálu M1	T1
Dávkovač materiálu M2	T2
Spínač X	X-start
Spínač Y	Y-start
Vibrační motorek 1	D63
Vibrační motorek 2	D57

Tab. 5-3: Ukázka řídicího G-kódu nanášené vrstvy, s využitím naprogramovaných komponent

Příkaz	Význam příkazu
G28 X	Vynulování osy X = spustí posuv v záporném směru X až do vzepnutí spínače X
G28 Y	Vynulování osy Y = spustí posuv v záporném směru Y až do vzepnutí spínače Y
T1	Volba materiálu M1
G1 E20	Dávkování materiálu z hlavního zásobníku (2 dávky)
G1 F3000	Rychlost pohybu 3000 mm/min
G90	Absolutní posuv
G0 X6.5 Y169	Přisuv k platformě
G91	Relativní posuv
M400	Ukončení všech procesů
M42 P57 S255	Spustit vibrační motor při napětí 5 V
G1 X-20	Posuv
G1 Y1	Posuv
G1 X20	Posuv
G1 Y1	Posuv
G1 X-20	Posuv

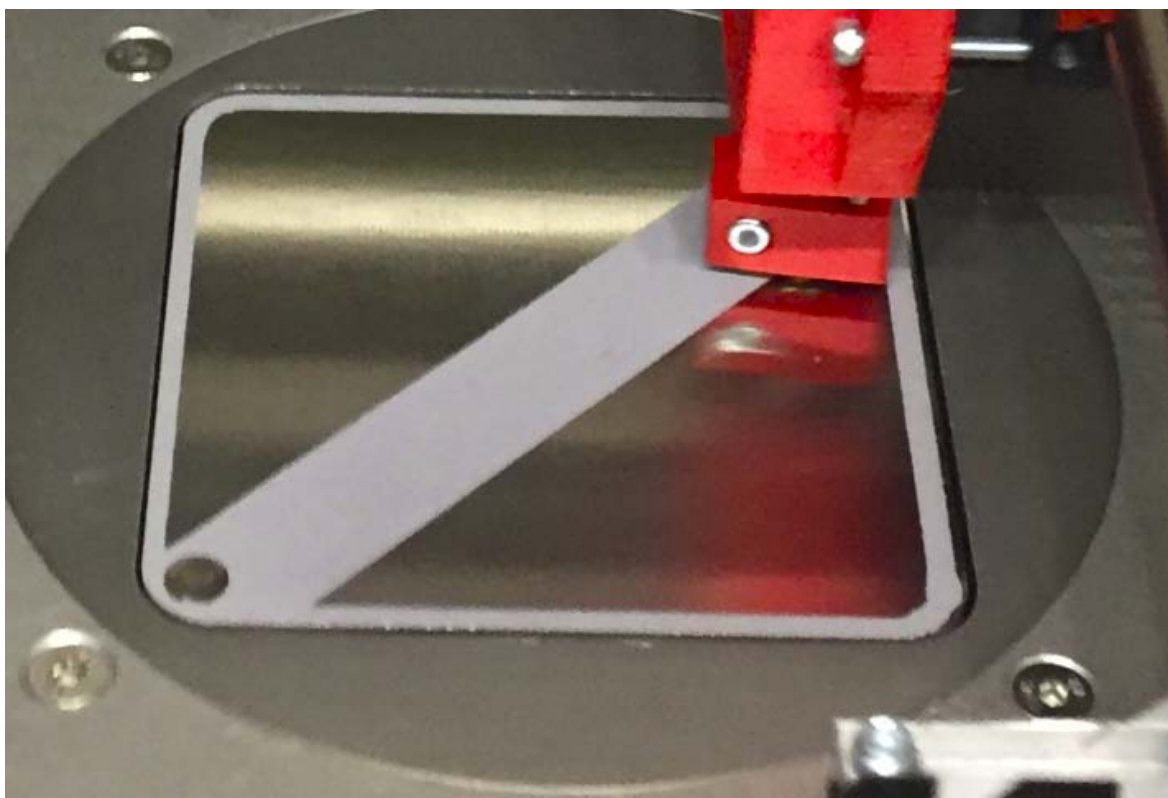
5.3 Testovací část

5.3.1 Kalibrace motorů pomocí referenčního tisku

Pro zajištění spolehlivosti a přesnosti nanášení bylo nutné zařízení před použitím zkalibrovat. Jako první proběhla kalibrace krokových motorů lineárních os. Motory se zkalibrovaly na základě výpočtu potřebných kroků na posuv o jeden milimetr, a byla vykonána korekce na základě reálného posuvu. Korekce těchto hodnot byla vložena do řídicího softwaru, tedy před dalším tiskem již nebude zapotřebí tuto kalibraci opakovat.

5.3.2 Kalibrace nanášecího zařízení s tiskárnou

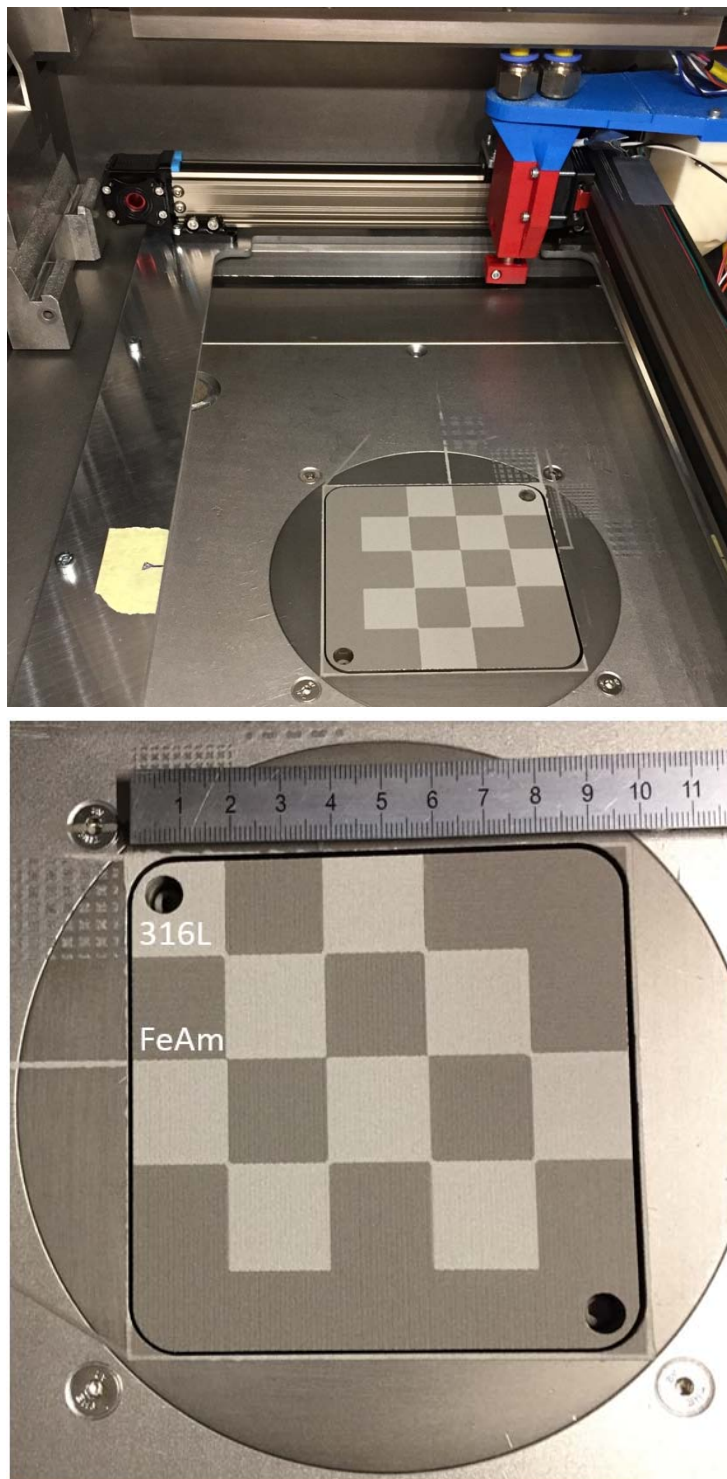
Druhou kalibrací je zapotřebí vykonávat po každém namontování nanášecího zařízení do tiskárny SLM 280HL. Jedná se o kalibraci nulového bodu a rovnoběžnosti os platformy. Jelikož se nanášená vrstva bude následně zpracovávat laserem, je zapotřebí, aby jejich souřadné systémy byly identické. Kalibrace se vykonává pomocí vytvořeného skriptu pro nanesení prášku po obrysu malé platformy. Při zaznamenání chyby se upraví definovaná pozice nulového bodu v řídicím skriptu nanášecího zařízení.



Obr. 5-26: Nanášení kalibračního skriptu pro úpravu nulového bodu

5.3.3 Nanášení multimateriálové vrstvy

Po vykonání všech kalibračních procedur bylo možné spustit první nanášení multimateriálové vrstvy v komoře tiskárny SLM 280HL. Použitý byl materiál 316L a FeAm s definovanými nanášecími parametry (viz Tab. 5-1). Pro demonstraci funkčnosti zařízení byl zvolen vzor nepravidelné šachovnice. Nanášení tohoto vzoru dopadlo úspěšně a v průběhu procesu se nevyskytly žádné problémy.



Obr. 5-27: Demontrace nanášení multimateriálové vrstvy v komoře tiskárny SLM 280HL

5.4 Tisk 3D multimateriálového dílu

Jelikož všechny vykonané experimenty nanášení multimateriálové vrstvy proběhly úspěšně, byl vykonán první experiment tisku 3D multimateriálového dílu se změnou materiálu ve všech třech osách. Vytisknuté byly dva kvádry o rozměru (20 x 20 x 10) mm a pro ukázkou možnosti dalšího využití byly do výšky 2 mm vytisknuté objekty různých tvarů. Pro vykonaný tisk byly použity materiály 316L a FeAm s definovanými nanášecími parametry (viz Tab. 5-1). Od druhé vrstvy stavby dílu, byla výška vrstvy upravena na 50 μm .



Obr. 5-28: Vytisknuté 3D multimateriálové díly

6 DISKUZE

Navržené nanášecí zařízení implementované do 3D tiskárny SLM 280HL je možné využít jak na kontrolované nanášení jedné vrstvy za účelem dalšího výzkumu multimateriálového nanášení, tak na plnohodnotnou stavbu 3D multimateriálových dílů. Zařízení je schopné připravovat jednotlivé vrstvy pro stavbu dílů na celé ploše malé platformy pro SLM o rozměrech (97,5 x 97,5) mm. Z důvodu časové náročnosti nanášení, kdy se doba nanesení kompletní vrstvy pozůstávající ze dvou materiálů pohybovala okolo 6 min, byla snaha tento proces výrazně urychlit. Za tímto účelem byla vykonána stavba pouze na části platformy o rozměru (60 x 30) mm, přičemž po obvodu tohoto naneseného sektoru byla vypalována tenká stěna, která do jisté výšky drží celou nanášenou strukturu prášku pohromadě (viz Příloha 1). Pomocí této redukce plochy nanášené vrstvy bylo možné snížit dobu nanášení jedné vrstvy na 2,5 min. Stavba byla vykonána do výšky 10 mm, a nevykazovala žádné problémy, nebo náznaky poškození ohraničující stěny. Pro tuto stavbu byla použita tloušťka nanášené vrstvy 50 μm a rychlost nanášení 3000 mm/min, tedy kompletní stavba trvala přes 8,3 hodiny. Jelikož je ovládání tohoto zařízení jenom částečně automatizované, stavba si vyžadovala neustálou přítomnost operátora, který manuálně spustil jak nanesení každé vrstvy, tak vypálení každé vrstvy. Z tohoto důvodu je pro další výzkum důležité plně automatizovat tento proces, k čemu se nabízí využití například možnosti nastavení zpoždění laseru na tiskárně. Po takovéto úpravě by ovšem jak nanášecí zařízení, tak laser pracovali na slepo, bez informací o stavu procesu toho druhého a proces tedy obnáší riziko poškození nanášecího zařízení laserem.

Byl navržen způsob přípravy dat pro zvolený přístup nanášení kontinuálním způsobem, který dosahoval rovnoměrného nanesení všech požadovaných sektorů s minimálním detailem (1 x 1) mm. Nutnost manuální přípravy pohybových příkazů je však zdlouhavá a pro tvorbu tvarově složitějších dílů velice obtížná. Jelikož příslušné softwary neuvažují s tak komplexním způsobem nanášení, je na zvážení možná úprava nanášecí strategie.

Vytvořená nanášecí hlavička splňovala svou funkci bez viditelných problémů. Hlavička byla zkonstruována tak, aby byla možná snadná výměna nanášecích trysek. Za tímto účelem byla otestována funkčnost zařízení s různými průměry výstupního otvoru trysky. Úspěšného nanášení bylo dosaženo s tryskami o průměrech 1 mm, 0,8 mm, 0,6 mm a 0,4 mm. Zvolená byla tryska o průměru 1 mm z důvodu časové náročnosti nanášené vrstvy menším průměrem trysky. Experiment každopádně prokázal, možnost vytváření detailu až do rozměru (0,4 x 0,4) mm. Pro další výzkum této hlavičky je vhodné vyřešit možnost uzavírání trysky, jak je nastíněné v 3 koncepčním řešení této práce, na základě, čeho by hlavička mohla disponovat zásobou prášků pro více vrstev a eliminovala by se nutnost časté výměny jak je tomu u navrženého zařízení. Toto rozšíření může mít výrazný vliv na snížení nanášecích časů, a tak i trvání celé stavby.

Nanášecí zařízení bylo navrženo jako celek, postavený na montážním rámu, který je možné jednoduše implementovat do tiskárny, nebo naopak odebrat. Z tohoto důvodu je možné vykonávat výzkum nanášení multimateriálové vrstvy i mimo tiskárnu SLM 280HL.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout, sestavit a otestovat zařízení pro nanášení dvou různých kovových prášků, které je schopné kompatibilně pracovat s tiskárnou kovových materiálů SLM 280HL.

Jelikož oblast multimateriálového tisku kovů technologie selective laser melting nebyla doposud nijak významně prozkoumána, byl zpracován přehled existujících patentů a možných přístupů k řešení.

Sestaveno bylo externí nanášecí zařízení, na kterém byly testovány tři vytvořené koncepty nanášecí hlavičky, inspirované patentovaným dávkovacím systémem s pipetou. Na základě vykonaných experimentů byly hlavní součásti tohoto systému nahrazeny mosaznou tryskou využívanou pro 3D tiskárny pracující s technologií fused deposition modeling a plochým vibračním motorkem s excentrem. Tyto komponenty byly pro navrhovaný systém použité poprvé, a dosáhly lepších výsledků než originální provedení s pipetou a piezokeramickým měničem. Změnou klíčových komponent bylo dosaženo výrazného snížení rozměrů nanášecího systému a větší konstrukční variability.

S vylepšenou nanášecí hlavičkou byly následně vykonané experimenty pro lepší prozkoumání přístupů nanášení dvou materiálů do jedné vrstvy a určení nanášecích parametrů vybraných materiálů. Byla nanášena čtyř-materiálová vrstva, na které byla demonstrována možnost sjednocení nanášecích parametrů vybraných materiálů, a to za účelem zjednodušení procesu přípravy pohybových příkazů. Vykonaným experimentem byla zjištěna dosažitelnost stejných nanášecích parametrů u materiálů FeAm a 316L.

Na základě vývojové části této práce bylo vykonané úspěšné zkonstruování nanášecího zařízení, nového hlavního zásobníku a naprogramování řídicího systému pro částečnou automatizaci nanášecího procesu.

Funkčnost vytvořeného zařízení byla demonstrována jak na kontrolovaném nanášení jedné multimateriálové vrstvy o minimální tloušťce 50 μm , tak na úspěšně vykonaném tisku 3D multimateriálového dílu složeného až z 200 vrstev. Pro výrobu tohoto dílu byly použity materiály FeAm a 316L, jejichž nanášecí parametry byly definovány na základě vykonaných experimentů této práce.

Navrženým zařízením implementovaným do tiskárny SLM 280HL je možné vytvářet díly se změnou materiálu ve vše třech osách, které doposud nejsme schopni vyrobit žádným jiným komerčním nanášečem na trhu. Bylo tak dosaženo rozšíření možné variability 3D tisku v technologii selektiv laser melting. Sestrojené zařízení je originální a otevírá nové možnosti výzkumu multimateriálových spojení. Všechny cíle diplomové práce byly úspěšně splněny.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Eric WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*. 2016, roč. 117, s. 371–392. ISSN 13596454.
- [2] KRANZ, J., D. HERZOG a C. EMMELMANN. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*. 2015, roč. 27, č. S1, s. S14001. ISSN 1042-346X.
- [3] CHIVEL, Yuri. New Approach to Multi-material Processing in Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2016, roč. 83, s. 891–898. ISSN 18753892.
- [4] New Multi-Material Upgrade Released For Prusa i3 MK2 3D Printer [online]. 3Dprint.com, 2016 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://3dprint.com/150853/multi-material-prusa-upgrade/>
- [5] About Additive Manufacturing: Material Jetting. Loughborough University [online]. Loughborough: Loughborough University, 2017 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>
- [6] Get to Market Fast with PolyJet [online]. Eden Prairie: STRATASYS, 2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/-/media/features/tabbed-billboard/direct/technologies/polyjet/tab-polyjet-build.png?h=669&w=576&la=en&hash=17EE2468A0EDBC189152B2D64738C661EC6A102E>
- [7] BREMEN, Sebastian, Wilhelm MEINERS a Andrei DIATLOV. Selective Laser Melting. *Laser Technik Journal*. 2012, roč. 9, č. 2, s. 33–38. ISSN 16137728.
- [8] Additive Manufacturing, Laser-Sintering and industrial 3D printing - Benefits and Functional Principle [online]. Krailling: EOS, 2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested
- [9] GAN, M.X. a C.H. WONG. Practical support structures for selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, roč. 238, s. 474–484. ISSN 09240136.
- [10] Support structures for metal 3D Printing (DMLS) [online]. Makernest Team, 2016 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=kQphIcCTFmw>
- [11] GU, D D, W MEINERS, K WISSENBACH a R POPRAWE. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012, roč. 57, č. 3, s. 133–164. ISSN 0950-6608.

- [12] Additive manufacturing of two metals in one product [online]. Marknesse: Netherlands Aerospace Centre, 2016 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.nlr.org/news/additive-manufacturing-of-two-metals-in-one-product/>
- [13] PLACHÝ, Jiří, Vít ŠREIBR a Adrián KVAŠŠAY. Studium rozhraní dvou kovových materiálů vytvořeného pomocí technologie SLM. Brno, 2018. SEMESTRÁLNÍ PRÁCE PŘEDMĚTU INŽENÝRSKÝ PROJEKT - ZKR. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
- [14] ANSTAETT, Christine a Christian SEIDEL. Multi-Material Processing. *Laser Technik Journal*. 2016, roč. 13, č. 4, s. 28–31. ISSN 16137728.
- [15] ZHANG, Xiaoji, Chao WEI, Yuan-Hui CHUEH a Lin LI. An Integrated Dual Ultrasonic Selective Powder Dispensing Platform for Three-Dimensional Printing of Multiple Material Metal/Glass Objects in Selective Laser Melting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2019, 141(1). DOI: 10.1115/1.4041427. ISSN 1087-1357. Dostupné také z: <http://manufacturing-science.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4041427>
- [16] SLM Solutions: The Path of the Powder [online]. SLM Solutions, 2014 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=gpmXdt9OTUc>
- [17] HOPPER FOR POWDER BED FUSION ADDITIVE MANUFACTURING. Singapore. WO2017018935country SG A1. Uděleno 02.02.2017. Zapsáno 25.07.2016.
- [18] DEMIR, Ali Gökhan a Barbara PREVITALI. Multi-material selective laser melting of Fe/Al-12Si components. *Manufacturing Letters*. 2017, roč. 11, s. 8–11. ISSN 22138463.
- [19] POWDER DISPENSING APPARATUS AND METHOD. Great Britain. US 2014/0348969 A1. Uděleno 27.11.2014. Zapsáno 19.06.2014.
- [20] Device and method for the preparation of building components from a combination of materials. Germany. US6861613 (B1). Uděleno 01.03.2005. Zapsáno 01.02.2001.
- [21] Dual selective laser sintering and nonmetal and metal melting 3D (three-dimensional) printing system. Čína. CN104923786 (A). Uděleno 23.09.2015. Zapsáno 11.05.2015.
- [22] REINVENTING POWDER BASED 3D PRINTING AS A MULTI-MATERIAL PROCESS [online]. Liège: Aerosint, 2018 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://aerosint.com/home/technology/>
- [23] DEVICE AND METHOD FOR MANIPULATING PARTICLES. Belgium. WO2018059833. Uděleno 05.04.2018. Zapsáno 21.08.2017. Dostupné z: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2018059833&recNum=1&maxRec=&office=&prevFilter=&sortOption=&queryString=&tab=PCT+Biblio>

- [24] CHIANRABUTRA, S., B.G. MELLOR a S. YANG. A Dry Powder Material Delivery Device for Multiple Material Additive Manufacturing. Southampton, 2014. Thesis (Doctoral). University of Southampton.
- [25] LI XIAOCHUN, YANG YONG a CHOI HONGSEOK. Apparatus and method of fabricating small-scale devices. USA. US2004012124 A1. Uděleno 22.01.2004. Zapsáno 10.07.2002.
- [26] HOU T. NG, RAANAN ZEHAVID, NAG B. PATIBANDLA, Hou T. Ng, Raanan Zehavi B. PATIBANDLA a Nag B. Patibandla. Powder delivery for additive manufacturing. USA. US 2017/0072636 A1. Uděleno 16.3.2017. Zapsáno 15.9.2016.
- [27] Low cost 3D printer that prints high-carbon steel [online]. iro3d, 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://iro3d.com/>
- [28] MJUNIT Belt Drive Linear Rail. Mjunit [online]. Dongguan: Dongguan MJUNIT Precision Mechanical Co., 2018 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <http://www.mjunit.com/download/MJUNITProductBrochure.pdf>
- [29] 3D laboratoř: RAPID PROTOTYPING [online]. Brno: FSI VUT v Brně, 2018 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/3d-laboratory/>
- [30] Příručka 3D tiskáře: Uživatelský manuál 3D tiskáren [online]. Praha: Prusa Research, 2018 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: https://prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3_cz_3_04.pdf
- [31] GPS T-type Screw Linear Slide Stage X Y Z Axis Sliding Table Module Effective Stroke 200mm+ Nema17 Stepper Motor. Aliexpress [online]. Shanghai: Alibaba Group, 2018 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/store/product/GPS-T-type-Screw-Linear-Slide-Stage-X-Y-Z-Axis-Sliding-Table-Module-Effective-Stroke/512235_32885943747.html?spm=2114.12010612.8148356.14.12656895Zr05dF
- [32] HIGH PRECISION BALL SCREW LINEAR MOTION GUIDE. FUYU [online]. Chengdu: Fuyu motion, 2018 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <https://www.fuyumotion.com/high-precision-ball-screw-linear-motion-guide.html>
- [33] LONG STROKE BELT DRIVEN ALUMINIUM LINEAR GUIDE RAIL. FUYU [online]. Chengdu: Fuyu motion, 2018 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <https://www.fuyumotion.com/long-stroke-belt-driven-aluminum-linear-guide-rail.html>
- [34] DUST WATER PROOF ENCLOSED BALL SCREW LINEAR MODULE. FUYU [online]. Chengdu: Fuyu motion, 2018 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: <https://www.fuyumotion.com/dust-water-proof-enclosed-ball-screw-linear-module.html>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

AM	Aditivní technologie
3D	Trojrozměrný
SLM	Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting)
FDM	Fused deposition modeling
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
UV	Ultrafialový
PJ	PolyJet
CMYKW	Cyan, magenta, yellow, key, white
CAD	Computer aided design
STL	Stereolitography

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1: Proces multimateriálového tisku součásti. 1D) jednomateriálová součást, 2D) laminární součást, 3D) 3D multimateriálová součást.....	13
Obr. 2-1: Součást vyrobená technologií PolyJet (PJ) [6].....	14
Obr. 2-2: Proces výroby technologií Selektivním Laserovým Tavením (SLM) [8].....	15
Obr. 2-3: Odstraňování podpůrných struktur [10].....	16
Obr. 2-4: Součást vyrobená ze dvou materiálů (nerezová ocel (SS 316) a niklová superslitina (Inconel 718) [12].....	17
Obr. 2-5: Ukázka diskrétního a gradientního přechodu mezi práškem nástrojové oceli a práškem mědi. Různé materiály a jejich odpovídající sady parametrů jsou barevně odlišné. Například sada parametrů (1) pro 100 % nástrojové oceli, sada parametrů (2) pro směs 70 % nástrojové oceli a 30 % mědi, sada parametrů (3) pro 30 % nástrojové oceli a 70 % mědi a sada parametrů (4) pro 100 % mědi.....	18
Obr. 2-6: Tisková komora zařízení SLM280HL s popisem její hlavních částí.....	19
Obr. 2-7: Dávkování materiálu nanášecem SLM280HL [16].....	19
Obr. 2-8: Upravené nanášecí zařízení pro SLM280HL [13].....	20
Obr. 2-9: Hlavní části upraveného nanášecího zařízení pro SLM280HL [13].....	20
Obr. 2-10: Bimetalové kvádry, ze kterých byly zhotoveny tělíska pro tahovou zkoušku s průřezem v jednotlivých vrstvách vzorku [13].....	21
Obr. 2-11: Patent upraveného zásobníku nanášече [17].....	22
Obr. 2-12: Koncept nanášecího zařízení s míchacím mechanismem pro tvorbu gradientního přechodu [18].....	22
Obr. 2-13: Princip fungování systém nanášení přesného množství prášků [19].....	23
Obr. 2-14: Ukázka posuvné desky (340), s přesnými dávkovacími dírami (350) [19].....	24
Obr. 2-15: Koncept zařízení, a princip výroby s postupem průběžného odsávání pršku [3].....	24
Obr. 2-16: Náskres patentu US 6861613 B1 [20].....	25
Obr. 2-17: Náskres patentu CN 104923786 A [21].....	26
Obr. 2-18: Ukázka multimateriálově nanášené vrstvy tiskárnou Aerosint [22].....	27

Obr. 2-19: Koncept nanášecího zařízení použitého v patentu společnosti Aerosint [22]	27
Obr. 2-20: Náčrtek patentu US 2004012124 A1 [25]	28
Obr. 2-21: Schéma experimentálního dávkovacího zařízení s pipetou [24]	28
Obr. 2-22: Sekvenční snímky zachycené vysokorychlostní kamerou na 0.01 sekundy od spuštění piezoelektrického prstence (B) až po jeho vypnutí (F) [24]	29
Obr. 2-23: Výsledky experimentu nanášení prášku skrze pipetu [24]	29
Obr. 2-24: Vzorky o šířce dráhy 85 μm , vytvořené s parametry: Průměr vývodu pipety 60 μm , Vzdálenost pipety od podložky 150 μm , rychlost tisku 5 mm/s, elektrické napětí 2 V [24]	30
Obr. 2-25: Schéma nanášení z různých materiálů [24]	30
Obr. 2-26: Náčrtek patentu US 2017/0072636 A1 [26]	31
Obr. 2-27: Nanášení práškového materiálu skrze trysku s šnekovým mechanismem [27]	32
Obr. 3-1: Schéma rozdělení tiskové plochy a koncept nanášecího zařízení	33
Obr. 3-2: Ukázka možného multimateriálového dílu pro ověření změny materiálu ve všech třech osách	35
Obr. 4-1: Konceptní návrh přesného vedení testovacího zařízení s dvěma pipetami	36
Obr. 4-2: Možnosti implementace nanášecího zařízení do tiskárny SLM 280HL a rozměry dveří tiskárny	37
Obr. 4-3: Možné velikosti pracovních prostorů tisku ve stávající tiskárně SLM 280HL	37
Obr. 4-4: Konceptní řešení implementace vedení nanášecí hlavičky s využitím stávajícího vedení nanášeče tiskárny SLM 280HL	39
Obr. 4-5: Redukční rámeček tiskárny SLM 280HL s vyznačeným nevyužitým prostorem pro možnost montáže pohybových mechanismů	39
Obr. 4-6: Konceptní řešení posuvu třemi lineárními osami upevněnými k redukčnímu rámečku tiskárny SLM 280HL	40
Obr. 4-7: Základní rozměry nanášecí hlavičky s jednou pipetou	42
Obr. 4-8: Popis dílů nanášecí hlavičky s jednou pipetou	43
Obr. 4-9: Vizualizace vytvoření virtuální mřížky procesem automatické kalibrace podložky [30]	43
Obr. 4-10: Základní rozměry 1. konceptu nanášecí hlavičky pro multimateriálový tisk	44
Obr. 4-11: Popis dílů 1. konceptu nanášecí hlavičky pro multimateriálový tisk	45

Obr. 4-12: Základní rozměry 2. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk.....	46
Obr. 4-13: Popis dílů 2. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk.....	46
Obr. 4-14: Ukázka způsobu postupného plnění a nanášení prášku 2. konceptem nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk: A) Nasypání daného množství prvního materiálu, B) Nanesení vrstvy a následné vyprázdnění zbytku prvního materiálu, C) Nasypání daného množství druhého materiálu, D) Nanesení vrstvy a následné vyprázdnění zbytku druhého materiálu.....	47
Obr. 4-15: Základní rozměry 3. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk.....	48
Obr. 4-16: Možné přepínání pozic otvorů regulační hřídelky vůči otvorům malého zásobníku prášku	48
Obr. 4-17: Popis dílů 3. konceptu nanášecí hlavice pro multimateriálový tisk.....	49
Obr. 4-18: Rozměry zvolené pipety a naznačení směru pohybu práškového materiálu	50
Obr. 4-19: Rozměry trysky s průměrem výstupního otvoru 1 mm, určené pro filamentovou strunu o průměru 3 mm a naznačení směru pohybu práškového materiálu	50
Obr. 4-20: Nanášec tiskárny SLM 280HL obsahující sekundární zásobník.....	51
Obr. 4-21: Popis originálního systému pro doplňování práškového materiálu v tiskárně SLM 280HL.....	52
Obr. 4-22: Schématické zobrazení změny řízení procesu tisku s upraveným nanášecím zařízením.....	53
Obr. 4-23: Příprava standardního procesu tisku a popis klíčových komponent.....	53
Obr. 4-24: Schéma proudění inertního plynu v komoře tiskárny.....	54
Obr. 4-25: Schéma pohybových mechanismů v komoře tiskárny.....	55
Obr. 5-1: Schématické zobrazení ovládání testovacího zařízení.....	58
Obr. 5-2: Schéma externího nanášecího zařízení s namontovanou hlavicí pro jeden materiál.....	59
Obr. 5-3: Testování systému nanášení a ovládacího skriptu na nanášecí hlavicí pro jeden materiál.....	59
Obr. 5-4: Porovnání nanesené vrstvy při použití rozdílných nanášecích prvků: A) tryska, B) pipeta.....	60
Obr. 5-5: Částice práškového materiálu ENAW2618.....	61
Obr. 5-6: Rovnoměrnost nánosu testovacích vrstev o výšce 170 μm , 150 μm a 130 μm	62
Obr. 5-7: Průřez nánosem testovacích vrstev o výšce 170 μm , 150 μm a 130 μm	62

Obr. 5-8:	Rovnoměrnost nánosu testovacích vrstev o výšce 100 μm , 70 μm a 55 μm	62
Obr. 5-9:	Průřez nánosem testovacích vrstev o výšce 100 μm , 70 μm a 55 μm	63
Obr. 5-10:	Nanášení vrstev o výšce 100 μm , 70 μm a 55 μm různými rychlostmi. Nanášecí rychlost: A) 600 mm/min. B) 1500 mm/min. C) 3000 mm/min.....	64
Obr. 5-11:	Testování různých vzdáleností mezi řádky (hatch distance). Vzdálenost mezi řádky: 1,5 mm, 1,3 mm, 1,2 mm 1,1 mm a 1 mm.....	65
Obr. 5-12:	Monochromatický pohled na testování různých vzdáleností mezi řádky (hatch distance) s 10krát zvětšenou výškou profilu. Vzdálenost mezi řádky: 1,5 mm, 1,3 mm, 1,2 mm 1,1 mm a 1 mm.....	65
Obr. 5-13:	Ukázka vzniklé chyby v kontaktu rohů čtyř nanášených sektorů a její možnost eliminace.....	66
Obr. 5-14:	Nanesená vrstva složená ze čtyř materiálů.....	67
Obr. 5-15:	Model nanášecího zařízení.....	69
Obr. 5-16:	Pozice a základní rozměry montážního rámu nanášecího zařízení v komoře tiskárny.....	69
Obr. 5-17:	Popis dílů pohybového vedení nanášecího zařízení.....	70
Obr. 5-18:	Nanášecí hlavice namontovaná na pohybovém vedení.....	71
Obr. 5-19:	Umístění koncových snímačů.....	71
Obr. 5-20:	Popis dílů hlavního zásobníku.....	72
Obr. 5-21:	Popis dílů dávkovacího mechanismu kazety hlavního zásobníku.....	73
Obr. 5-22:	Popis dílů dokovací stanice.....	74
Obr. 5-23:	Rozvodová krabice elektroniky.....	74
Obr. 5-24:	Schématické zapojení elektroniky nanášecího zařízení do desky Ramps 1,4... ..	75
Obr. 5-25:	Vyvedení kabelů z komory tiskárny SLM 280HL.....	76
Obr. 5-26:	Nanášení kalibračního skriptu pro úpravu nulového bodu.....	78
Obr. 5-27:	Demonstrace nanášení multimateriálové vrstvy v komoře tiskárny SLM 280HL	79
Obr. 5-28:	Vytisknuté 3D multimateriálové díly.....	80

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Fyzikální charakteristiky vybraných materiálů z experimentu [24].....	29
Tab. 4-1	Parametry lineárních os [28,31,32,33,34].....	41
Tab. 5-1	Jednotné nanášecí parametry definované pro zvolené materiály.....	67
Tab. 5-2	Seznam komponent a jejich nastavená definice v G-kódu.....	77
Tab. 5-3	Ukázka řídicího G-kódu nanášené vrstvy, s využitím naprogramovaných komponent.....	77

12 SEZNAM PŘÍLOH

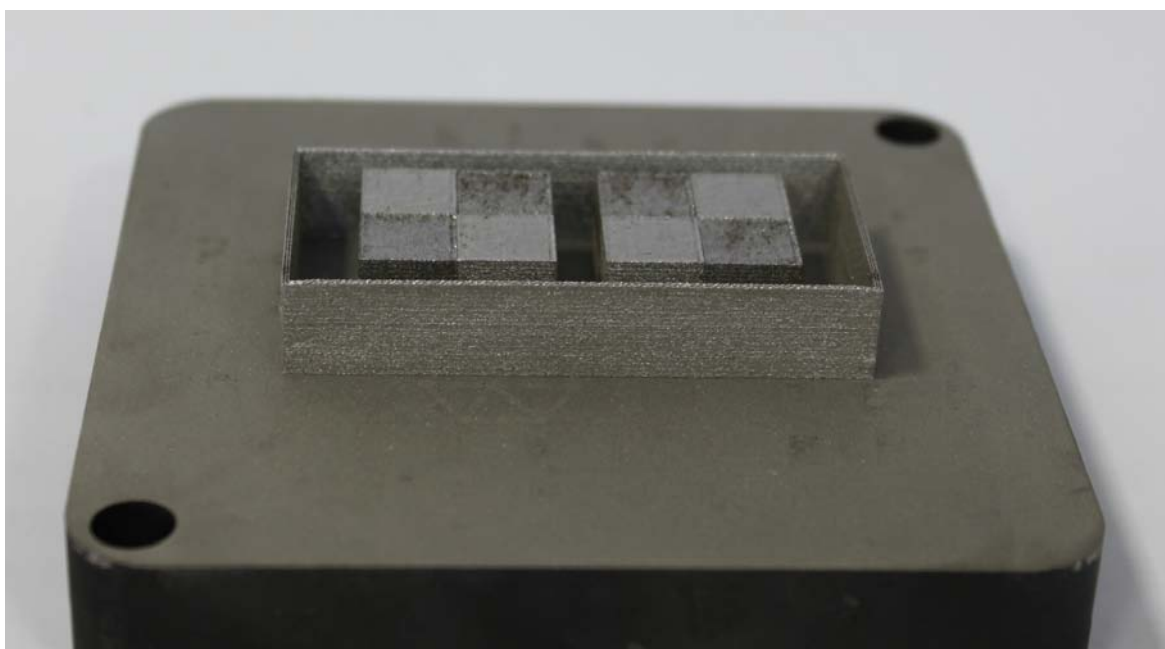
Příloha A: Fotografická dokumentace

Externí přílohy:

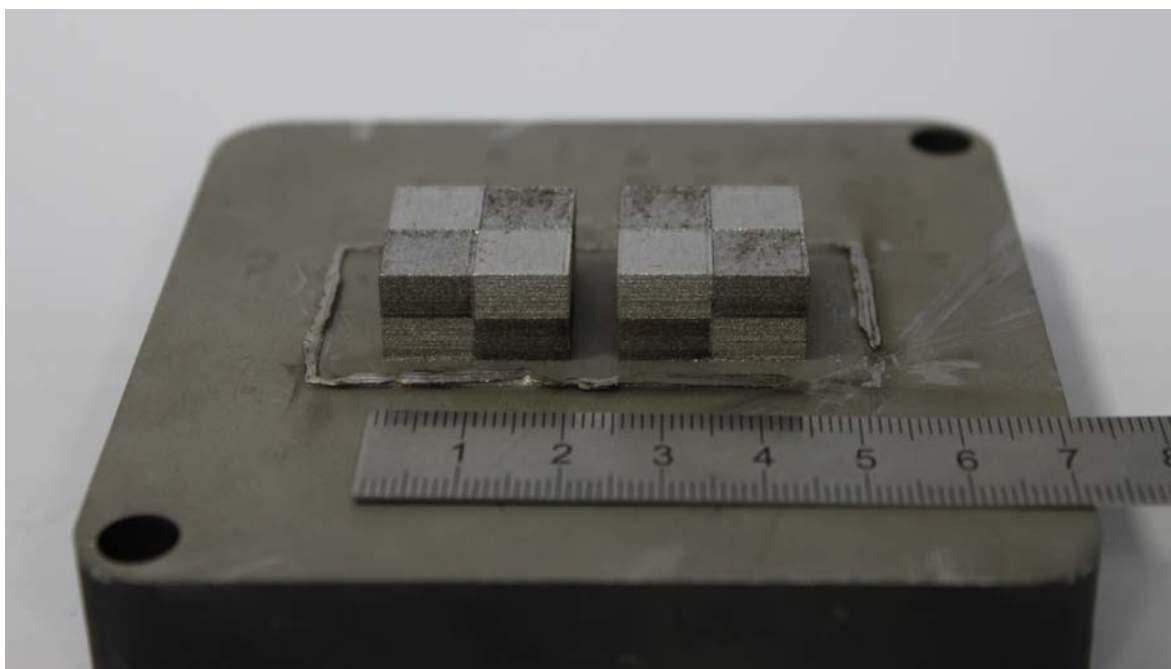
Příloha B: Výkresová dokumentace

Příloha C: Digitální data (CD)

12.1 Příloha A



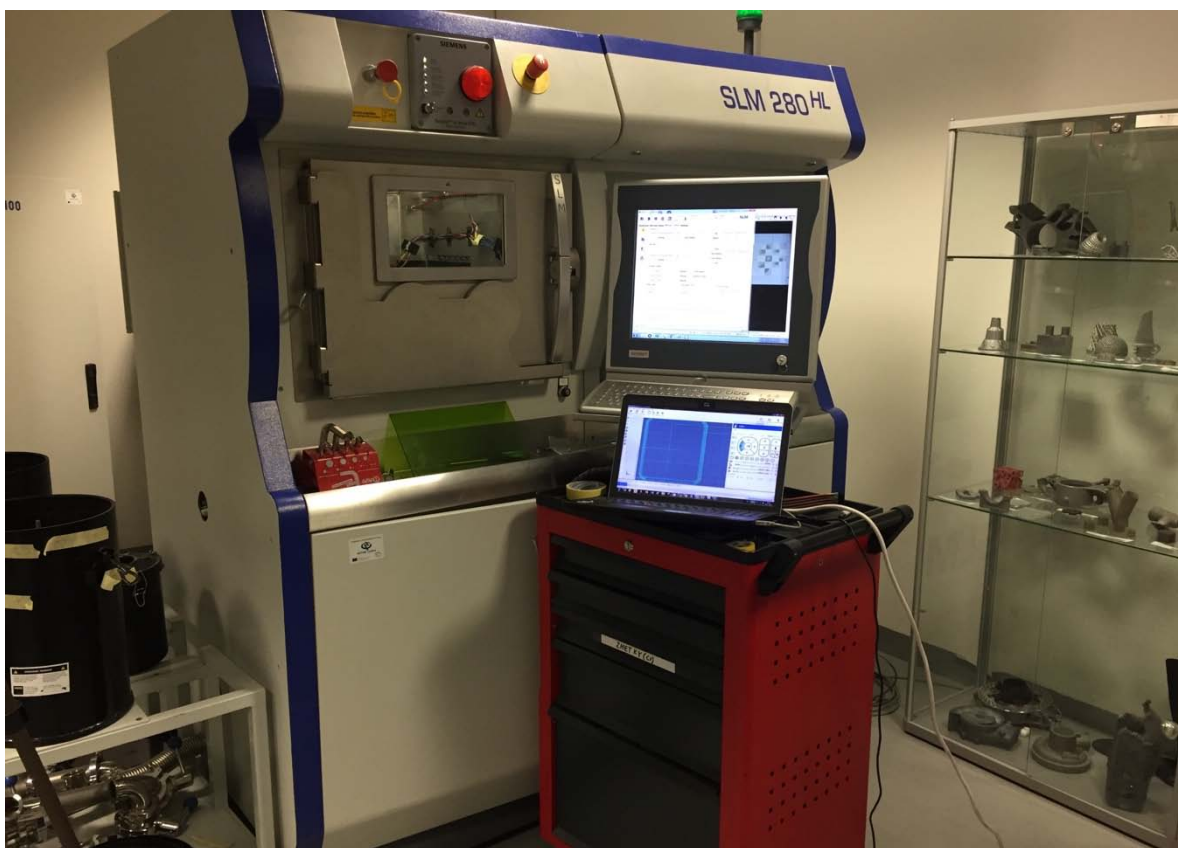
Obr. A-1: 3D multimateriálový díl s pomocnou stěnou pro redukci nanášecí plochy



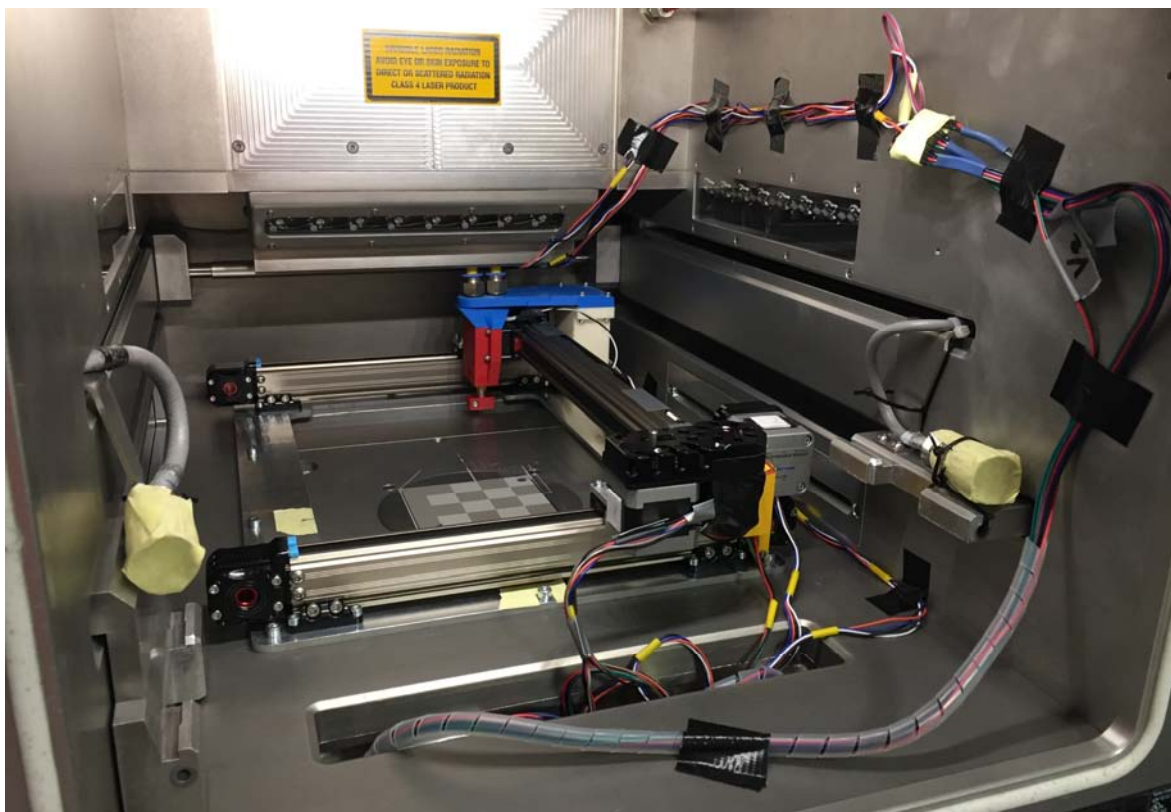
Obr. A-1: 3D multimateriálový díl po odstranění pomocné stěnou



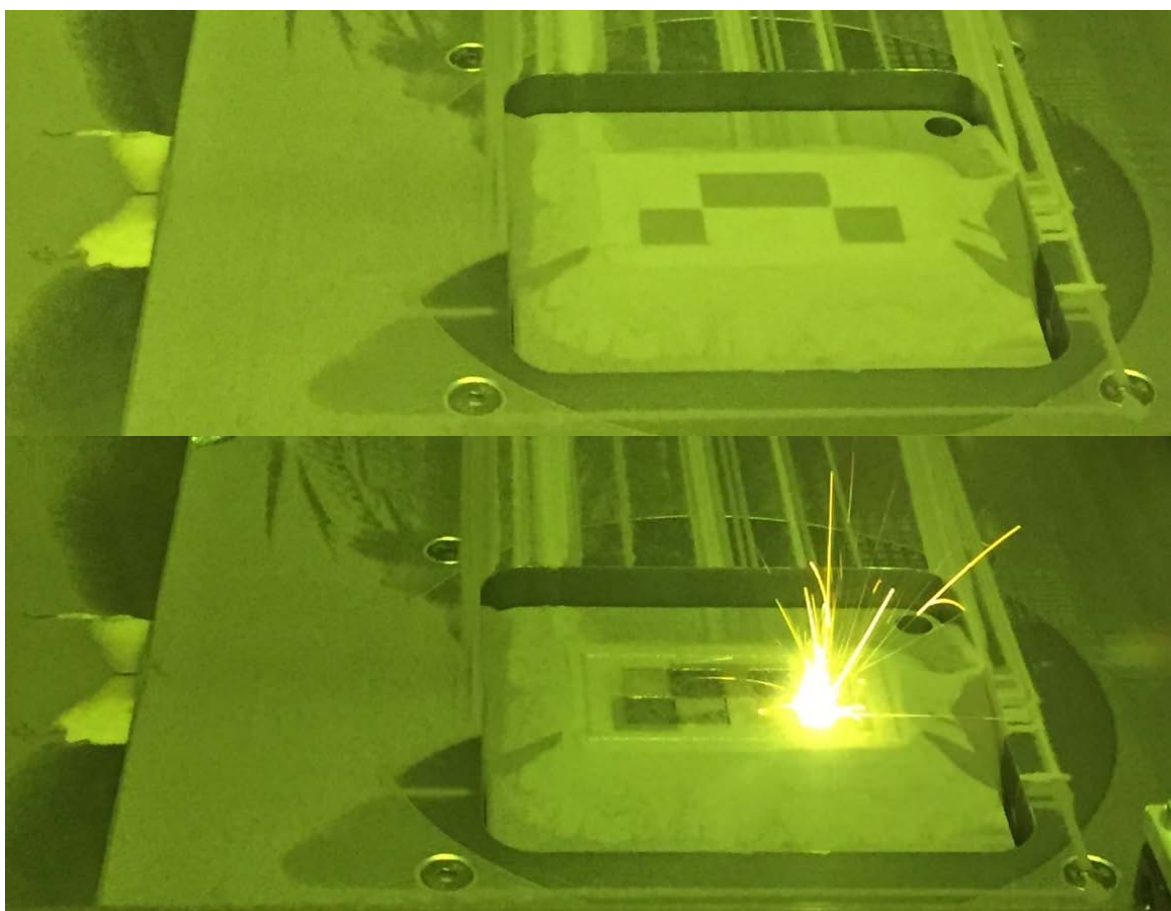
Obr. A-3: 3D multimateriálový díl uříznutý drátořezem od platformy



Obr. A-4: Pracovní stanoviště



Obr. A-5: Nanášecí zařízení připravené k začátku procesu tisku



Obr. A-6: Proces tisku